



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY**

**A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

**ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY**

DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

## MODEL EXPERIMENTÁLNÍHO ZAŘÍZENÍ PRO STUDIUM PŘESTUPU TEPLA V JADERNÉM REAKTORU

TEST FACILITY MODEL FOR STUDYING THE HEAT TRANSFER IN NUCLEAR REACTOR

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Miroslav Harant**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing. Jitka Matějková**

**BRNO 2016**

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav elektroenergetiky

**Student:** Miroslav Harant

**ID:** 164803

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2015/16

## NÁZEV TÉMATU:

**Model experimentálního zařízení pro studium přestupu tepla v jaderném reaktoru**

## POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Seznamte se s problematikou přestupu tepla v jaderném reaktoru, detailněji s problematikou týkající se krize varu a dopadu na jadernou bezpečnost.
2. Seznamte se s termohydraulickým programem TRACE a grafickým rozhraním SNAP.
3. Vytvořte model experimentálního zařízení v programu TRACE.
4. Proveďte simulaci na základě naměřených hodnot a zhodnoťte přesnost modelu.

## DOPORUČENÁ LITERATURA:

Literatura: dle pokynů vedoucího

**Termín zadání:** 8.2.2016

**Termín odevzdání:** 24.5.2016

**Vedoucí práce:** Ing. Jitka Matějková

**Konzultant bakalářské práce:**

**doc. Ing. Petr Toman, Ph.D., předseda oborové rady**

## UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Bibliografická citace práce:

HARANT, M. Model experimentálního zařízení pro studium přestupu tepla v jaderném reaktoru. Bakalářská práce. Brno: Ústav elektroenergetiky FEKT VUT v Brně, 2015, 46 stran.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. Díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

.....

## **ABSTRAKT**

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem simulace smyčky primárního okruhu experimentálního zařízení pro studijní účely krize varu. V první části je vysvětlena obecná problematika jaderných elektráren. V druhé části je podrobně vypracována kapitola zabývající se krizí varu. Dále je uveden popis experimentálního zařízení a jeho vypracování v termohydraulickém programu TRACE.

## **KLÍČOVÁ SLOVA:**

Jaderná energetika, krize varu; kritický tepelný tok; termohydraulický program trace

## **ABSTRACT**

This bachelor's thesis describes the design of the primary circuit simulation loop experimental facility for studying purposes boiling crisis. In the first part is explained the general issue of nuclear power plants. In the second part is elaborated in detail dealing with the crisis boil. The following is a description of the experimental device and it's elaboration in the thermohydraulic program TRACE.

## **KEY WORDS:**

Nuclear energy, boiling crisis, critical heat flux, thermohydraulic program trace

## OBSAH

<b>SEZNAM OBRÁZKŮ.....</b>	<b>8</b>
<b>SEZNAM TABULEK .....</b>	<b>9</b>
<b>SEZNAM ZKRATEK.....</b>	<b>10</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ.....</b>	<b>11</b>
<b>1 ÚVOD .....</b>	<b>14</b>
<b>2 JADERNÁ ENERGETIKA.....</b>	<b>15</b>
2.1 ROVNICE ŠTĚPNÉ REAKCE.....	15
2.2 ŘÍZENÁ ŘETĚZOVÁ REAKCE.....	17
2.3 PRŮBĚH REAKTORU .....	18
2.4 PRINCIP TLAKOVODNÍ JADERNÉ ELEKTRÁRNY .....	19
2.5 JADERNÁ BEZPEČNOST .....	19
2.5.1 DĚLENÍ JADERNÉ BEZPEČNOSTI .....	20
2.5.2 BEZPEČNOST PRIMÁRNÍHO OKRUHU.....	20
<b>3 ODVOD TEPLA Z PALIVOVÝCH ELEMENTŮ K TEPLOSMĚNNÉ PLOŠE .....</b>	<b>21</b>
3.1 VEDENÍ TEPLA.....	21
3.1.1 VEDENÍ TEPLA VE VÁLCOVÉ PALIVOVÉ TYČI .....	21
3.1.2 VEDENÍ TEPLA V POVLAKU .....	22
3.2 SDÍLENÍ TEPLA MEZI PALIVEM A POVLAKEM .....	22
<b>4 PŘESTUP TEPLA .....</b>	<b>24</b>
4.1 OBECNÉ ŘEŠENÍ POMOCÍ TEORIE PODOBNOSTÍ .....	24
4.2 JEDNOFÁZOVÉ PROUDĚNÍ.....	25
4.2.1 JEDNOFÁZOVÉ NUCENÉ PROUDĚNÍ – KONVEKTIVNÍ PŘESTUP .....	25
4.2.2 JEDNOFÁZOVÉ PŘIROZENÉ PROUDĚNÍ – KONVEKTIVNÍ PŘESTUP.....	26
4.2.3 JEDNOFÁZOVÉ NUCENÉ PROUDĚNÍ – KONDUKTIVNÍ PŘESTUP .....	26
4.2.4 JEDNOFÁZOVÉ PŘIROZENÉ PROUDĚNÍ – KONDUKTIVNÍ PŘESTUP .....	27
4.3 DVOUFÁZOVÉ PROUDĚNÍ.....	27
4.3.1 REŽIMY PROUDĚNÍ VODY OHŘÍVANÝM KANÁLEM .....	29
4.3.1.1 Krize varu prvního druhu .....	30
4.3.1.2 Krize varu druhého druhu.....	31
4.4 EXPERIMENTÁLNÍ METODY ZABÝVAJÍCÍ SE URČENÍM KRIZÍ VARU .....	31
4.4.1 METODA EMPIRICKÝCH VZTAHŮ .....	32
4.4.2 METODA ROZMĚROVÉ ANALÝZY .....	32
4.4.3 METODA PODOBNOSTI .....	32
<b>5 MODEL EXPERIMENTÁLNÍHO ZAŘÍZENÍ PRO STUDIJNÍ ÚČELY KRIZE VARU.....</b>	<b>33</b>
5.1 EXPERIMENTÁLNÍ ZAŘÍZENÍ .....	34
5.2 TERMOHYDRAULICKÝ PROGRAM TRACE .....	35
5.3 GRAFICKÉ ROZHRANÍ SNAP.....	35
5.4 MODEL EXPERIMENTÁLNÍ SMYČKY .....	36
5.5 MODEL PRO TEST ČERPADLA .....	37

---

5.5.1 VYHODNOCENÍ.....	39
<b>6 ZÁVĚR.....</b>	<b>44</b>
<b>POUŽITÁ LITERATURA .....</b>	<b>45</b>

## SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 2-1 Štěpení těžkých a slučování lehkých jader [9] .....</i>	<i>16</i>
<i>Obr. 2-2 Cyklus neutronů v tepelném reaktoru [13] .....</i>	<i>18</i>
<i>Obr. 2-3 Princip jaderné elektrárny s tlakovodním reaktorem [8] .....</i>	<i>19</i>
<i>Obr. 3-1 Řez palivovým elementem [1] .....</i>	<i>22</i>
<i>Obr. 4-1 Charakteristika přestupu tepla ve velkém objemu [1] .....</i>	<i>28</i>
<i>Obr. 4-2 Režimy dvoufázového proudění vody procházející kanálem [7] .....</i>	<i>29</i>
<i>Obr. 5-1 Reálná vizualizace smyčky [14] .....</i>	<i>33</i>
<i>Obr. 5-2 Technologické schéma [14] .....</i>	<i>35</i>
<i>Obr. 5-3 Návrh primárního okruhu v grafickém rozhraní SNAP .....</i>	<i>39</i>
<i>Obr. 5-4 Okruh pro test čerpadla .....</i>	<i>39</i>
<i>Obr. 5-5 Náběh čerpadla .....</i>	<i>40</i>
<i>Obr. 5-6 Reakce RV .....</i>	<i>40</i>
<i>Obr. 5-7 Tlak potrubí úseku CP-PH .....</i>	<i>41</i>
<i>Obr. 5-8 Tlak na PH .....</i>	<i>41</i>
<i>Obr. 5-9 Tlak na V .....</i>	<i>42</i>
<i>Obr. 5-10 Tlak potrubí úseku V-CP .....</i>	<i>42</i>



## SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 2-1 Energie uvolněná z jednoho štěpení [5] .....</i>	<i>16</i>
<i>Tab. 4-1 Znázornění hodnot součinitele přestupu tepla u vybraných reaktorů [1] .....</i>	<i>24</i>
<i>Tab. 4-2 Hodnoty konstanty c pro vztah (4.25) [1] .....</i>	<i>29</i>
<i>Tab. 5-1 Provozní parametry experimentální smyčky [14] .....</i>	<i>33</i>
<i>Tab.5-2 Porovnání výsledků z měření .....</i>	<i>43</i>

**SEZNAM ZKRATEK**

<b>Značka</b>	<b>Popis</b>
AGR	Advanced gas cooled reactor – Pokročilý plynem chlazený reaktor
BWR	Boiling water reactor - Varný reaktor
C	Kondenzátor
ČP	Hlavní cirkulační čerpadlo
ČS	Sekundární čerpadlo
DN	Jmenovitá světlost potrubí
EIA	Enviromental impact assessment
EPMD	Ethylen propylen dien monomer
FBR	Fast breeder reator - Rychlí množivý reaktor
HTGR	High temperature gas cooled reactor – vysokoteplotní plynem chlazený reaktor
HWGCR	Heavy water gas cooled reactor - Reaktor moderovaný těžkou vodou a chlazený plynem
CHV	Chladicí věž
ITER	Mezinárodní termonukleární reaktor
JE	Jaderná elektrárna
KS-150	První československý reaktor moderovaný těžkou vodou a chlazený CO <sub>2</sub>
KT	Kritický tepelný tok
PH	Přehřívák
PWR	Pressurized water reactor - Tlakovodní reaktor
Q	Průtokoměr
RV	Regulační ventil s pohonem
SNAP	Symbolic nuclear analysis package
TRACE	Trac/relap advanced computational engine
TS	Testovací sekce
V	Výměník
VT	Kompenzátor objemu
VVER	Vodo-Vodyanoi Energetichesky Reaktor - Vodo-vodní energetický reaktor

## SEZNAM SYMBOLŮ

Značka	Jednotka	Popis
A		nukleonové číslo
$b_{kr}$		kritický poměr
c	J/kgK	měrná tepelná kapacita
$d_h$	m	hydraulický průměr
E	J	energie
f		součinitel využití tepelných neutronů
Fo		Fourierovo číslo
Gr		Grasshoffovo číslo
k		multiplikační koeficient
$k_{ef}$		efektivní multiplikační koeficient
$k_p$	mm	drsnost povrchu
$k_{\infty}$		multiplikační koeficient pro nekonečné prostředí
$k_T$		korekční činitel zahrnující vliv teplotního spádu v mezní vrstvě
$k_Z$		korekční činitel zahrnující vliv přestupu tepla ve vzdálenosti $r_{vz}$
l	m	délka
L	m	charakteristický rozměr
$n_i$		počet neutronů i-té generace
$n_{i-1}$		počet neutronů i-1 generace
Nu		Nusseltovo číslo
O	m	smáčený obvod
p	Pa	tlak
Pe		Pécletovo číslo
Pr		Prandtlovo číslo
$p_{ro}$		součinitel pravděpodobnosti úniku v rezonanční oblasti
q	W/m <sup>2</sup>	tepelný tok
$q_h$	W/m	lineární tepelný výkon
$q_{kr}$	W/m <sup>2</sup>	kritický tepelný tok
$q_v$	W/m <sup>3</sup>	objemový výkon tepla
Ra		Rayleighovo číslo

---

Re		Reynoldsovo číslo
$r_u$	m	poloměr palivové tyče
$r_{vz}$	m	vzdálenost od palivové tyče
S	$m^2$	plocha
t	s	čas
T	K	termodynamická teplota
$\Delta T$	K	teplotní rozdíl
Ta	s	střední doba života neutronů
Tc	K	teplota chladicího média
$t_g$	$^{\circ}C$	střední teplota plynu
$T_p$	K	teplota teplosměnného povrchu
$T_z$	K	teplota teplosměnné plochy paliva
v	m/s	rychlost
We		Weberovo číslo
Z		atomové číslo

$\alpha$	$\text{W/m}^2\text{K}$	součinitel přestupu tepla
$\alpha_b$	$\text{W/m}^2\text{K}$	součinitel přestupu tepla v případě styku paliva s povlakem
$\alpha_F$	$\text{W/m}^2\text{K}$	součet všech součinitelů přestupu tepla mající vliv na vyhořívání paliva
$\alpha_G$	$\text{W/m}^2\text{K}$	součinitel přestupu tepla v plynové mezeře
$\alpha_r$	$\text{W/m}^2\text{K}$	součinitel přestupu tepla charakterizující přírůstek vedení tepla sáláním
$\gamma$	$\text{K}^{-1}$	objemová roztažnost
$\delta$	m	šířka plynové mezery
$\varepsilon$		multiplikační součinitel rychlých neutronů
$\varepsilon_k$		bezrozměrné kritérium
$\eta_n$		součinitel reprodukce neutronů
$\eta$	Pa s	dynamická viskozita
$\nu$	$\text{m}^2/\text{s}$	kinematická viskozita
$\vartheta(T)$	$\text{W/m}$	integrální tepelná vodivost
$\lambda$	$\text{W/mK}$	měrná tepelná vodivost
$\Lambda$		pravděpodobnost setrvání neutronu v soustavě
$\xi$		ztrátový součinitel
$\rho$	$\text{kg/m}^3$	hustota
$\Phi$	neutron/ $\text{ms}^{-1}$	hustota neutronového toku

# 1 ÚVOD

Jaderná energie je poslední dobou velice diskutované téma a doprovází populaci již celá desetiletí. Od doby co se Enrico Fermi podílel na vývoji prvního jaderného reaktoru v centru města Chicaga, se vývoj jaderných reaktorů doposud nezastavil. Protože jaderné palivo je spolehlivou náhradou fosilních paliv a význam jaderné energetiky jistojistě do budoucna dále poroste.

Jaderné palivo má vysoký objemový tepelný výkon. Palivo, které je složeno z palivových souborů se štěpí v aktivní zóně, ve které dochází k vysokým hustotám tepelných toků. Z toho důvodu se musí jaderné palivo dostatečně a efektivně chladit.

V normálním provozu tlakovodního reaktoru dochází v aktivní zóně k jednofázovému proudění chladicí látky. V mimořádných situacích jako je například ztráta chlazení, může přejít chladicí látka k varu a změnit tak proudění ve vyhřívacím kanálu na dvoufázové. Tepelný tok se zvyšuje až do mezního stavu, který se nazývá kritický tepelný tok (KTT). Jestliže se chladivo dostane za hodnotu KTT, prudce se zvyšuje teplota na povrchu palivových tyčí a součinitel přestupu tepla se snižuje. To může mít za následek tavení aktivní zóny a proto je KTT důležitým parametrem při projektování reaktorů.

Tato práce v první kapitole pojednává obecně o jaderné energetice a jaderné bezpečnosti. Dále je teoreticky přiblížen odvod tepla vedením palivovou tyčí a přestup tepla do chladicí látky přes teplosměnnou plochu. V další kapitole jsou detailněji rozebrány oblasti jednofázového a dvoufázového proudění. Práce dále zahrnuje popis experimentální smyčky pro studijní účely přestupu tepla, seznámení s výpočetním termohydraulickým programem TRACE a návržení experimentální smyčky v grafickém rozhraní SNAP.

V závěrečné části je navržen primární okruh experimentálního zařízení v grafickém rozhraní SNAP. Ověření modelu proběhlo na zjednodušeném okruhu bez testovací sekce, kondenzátoru a kompenzátoru objemu.

## 2 JADERNÁ ENERGETIKA

Počátky jaderné energetiky se datují od poloviny 20 století, kdy byl uveden do provozu první Ruský vodou chlazený a grafitem moderovaný reaktor s elektrickým výkonem 5 MW v Obminsku 1954 a první Americký tlakovodní reaktor s elektrickým výkonem 60 MW v Shippingport 1957. Byly to reaktory tzv. I. generace. Hovoříme tedy o reaktorových prototypch, které měly za úkol ověřit a aplikovat dosavadní teoretické znalosti. V tehdejší době se výzkum jaderné energetiky vyvíjel velmi rychle a byly i naivní představy, že všechno bude poháněno jaderným reaktorem jako např. automobily, vlaky apod. Velký jaderný rozmach zapříčinil stavbu dalších reaktorů s větším energetickým využitím. Výzkum jaderné energetiky tlumily v průběhu let reakce veřejnosti. S ohledem na havárie elektráren Three Mile Island 1979, Černobyl 1986 a Fukušima 2011.

Důvody, které stále vedou k rozvoji:

- 1) Útlum spalování fosilních paliv. Jaderné palivo má na jednotku objemu mnohonásobně větší energetický potenciál než zmíněné fosilní paliva.
- 2) Zlepšení životního prostředí v reakci na uhelné elektrárny.
- 3) Uchování fosilních paliv pro efektivnější využití.

Kvalita černého uhlí stále klesá, protože se vyskytuje ve stále větších hloubkách a spalování více nečistého uhlí přináší do ovzduší více škodlivin a emisí.

Česká republika měla a má poměrně dobré zásoby uranových rud a tato skutečnost společně s minulými vztahy s Ruskem vedly k vybudování jaderných elektráren na českém území. První Československá jaderná elektrárna byla postavena v Jaslovských Bohunicích 1972 s těžkovodním reaktorem typu KS-150. Byl chlazený oxidem uhličitým, moderovaný těžkou vodou a pro štěpení využíval přírodní uran. Tento reaktor je již odstaven. Současné jaderné elektrárny na českém území tvoří Temelín s tlakovodními reaktory VVER-1000 a Dukovany s tlakovodními reaktory VVER-440, které spadají do tzv. II. generace reaktorů, u kterých proběhly změny oproti reaktorům I. generace. Inovace spočívala v hlubším využití vyhořívání paliva, prodloužení palivového cyklu, instalaci pasivních bezpečnostních prvků. To celé vedlo k potenciálnímu zvýšení životnosti elektrárny přibližně na 60 let. III. generace se od II. generace liší hlavně v instalaci více bezpečnostních systému.

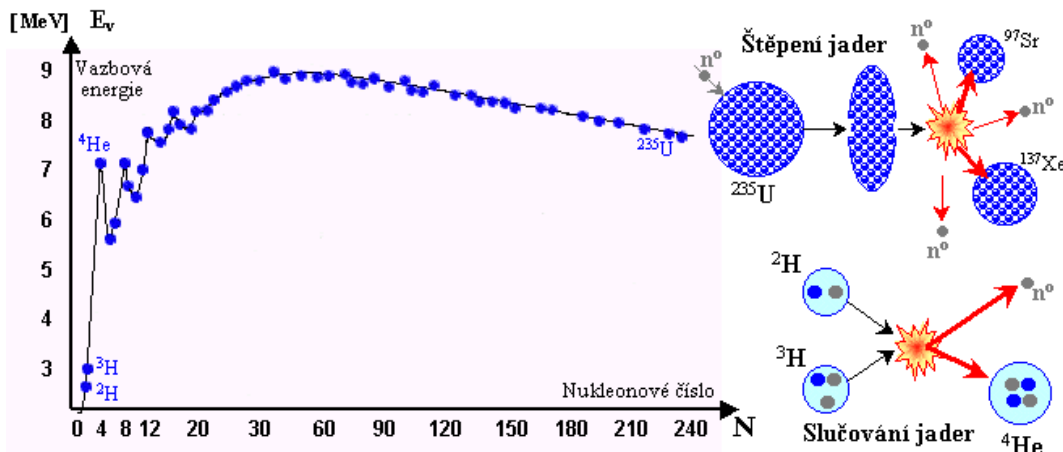
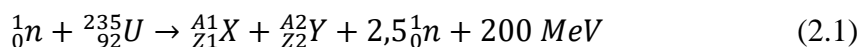
Další výzkum a vývoj štěpných reaktorů spočívá v lepším naprojektování celé elektrárny s hlavním důrazem na bezpečný chod elektrárny, účinnější využití paliva, skoro nulové produkci radioaktivního odpadu. A celou řadou dalších revolučních změn. Rýsuje se tu také možnost využití termonukleárních reaktorů, které by využívali termojadernou fúzi. Jedná se o slučování lehkých jader vlivem vysokých teplot v řádu milionů stupňů celsia. Nyní probíhá výstavba Mezinárodního termonukleárního experimentálního reaktoru ITER ve francouzském městě Cadarache. Na jeho výstavbě se podílí v podstatě celá světová energetická společnost, jako je např. Evropská unie, USA, Rusko, Čína a další.[2][3]

Při projektování jaderné elektrárny se vypracovává ekologická správa EIA. Jedná se o vyhodnocení vlivů JE na životní prostředí. Zahrnuje například vliv na okolní ovzduší, klima, hluk, faunu a floru, ekosystémy, dopravní infrastrukturu a v poslední řadě rizika a havárie JE.

### 2.1 Rovnice štěpné reakce

V první řadě si přiblížíme dvě kritéria, ze kterých štěpná reakce vychází. Při jediném štěpení dochází k uvolnění přibližně 200 MeV celkové energie a k uvolnění dvou až tří neutronů. Tyto

kritéria jsou z hlediska využití jaderné energie přínosem, neboť při dostatečně vyváženém stavu dosáhneme samo udržitelné jaderné reakce.



Obr. 2-1 Štěpení těžkých a slučování lehkých jader [9]

Jestliže neutron  $n$  narazí na izotop uranu  ${}^{235}\text{U}$ , zapříčiní štěpení a uran se rozdělí na dva vysoce radioaktivní odštěpky ( $X$ ,  $Y$ ) a dojde k uvolnění dvou až tří neutronů. Rovnice jaderné reakce rovněž musí splňovat podmínky součtu protonových a nukleonových čísel odštěpků

$$Z_1 + Z_2 = 92 \quad (2.2)$$

$$A_1 + A_2 = 236 - k \quad (2.3)$$

kde  $k$  značí počet uvolněných neutronů.

Vzniklé neutrony rozlišujeme do dvou kategorií. Na okamžité neutrony, vznikající krátce po štěpení a tvoří více než 99% celkového počtu neutronů a na zpožděné, které jsou emitovány po několika sekundách po štěpení. Procentuální zastoupení zpožděných neutronů činí 0,69%. Bez nich by byla regulace výkonu reaktoru nepříznivě ztížena. Štěpná reakce je také doprovázena emisí fotonů a částic beta.

V přírodním uranu se vyskytuje 99% izotopu  ${}^{238}\text{U}$ , 0,7%  ${}^{235}\text{U}$  a nepatrné množství  ${}^{234}\text{U}$ . Izotopy  ${}^{238}\text{U}$  jsou štěpitelné pouze neutrony s energií větší než 1,1 MeV, zatímco jádra  ${}^{235}\text{U}$  jsou štěpitelná neutrony o energii 0,025 eV. Neutron, který vznikne při štěpení jader má však počáteční energii 2 MeV, ale jeho energie klesá na 0,5 MeV, z důvodu zpomalení nepružným rozptylem na jádrech  ${}^{238}\text{U}$ .

Jednotky	[MeV]	[%]
Kinetická energie odštěpků	165,4	83,4
Energie volných neutronů	6,0	3,0
Energie okamžitého záření gama	6,0	3,0
Energie neutrin	11,1	5,6
Energie záření gama při rozpadu	5,0	2,5
Energie záření beta při rozpadu	5,0	2,5
Celkem	198,5	100,0

Tab. 2-1 Energie uvolněná z jednoho štěpení [5]



Řešení pro lehkovodní reaktory spočívá v obohacení přírodního uranu izotopu  $^{235}\text{U}$  na přibližně 5% a ve zpomalení neutronů na energii 0,025 eV. Ke zpomalení neutronů se zpravidla používá moderátor. Moderátor je látka s velmi lehkými jádry. Typický zástupce je například voda, v níž probíhá intenzivní rozptyl a malá neutronová absorpce.

Jestliže je moderátor rovnoměrně rozptýlen v palivu hovoříme o homogenních reaktorech a je-li moderátor oddělen od paliva, který tvoří v moderátoru oddělenou mříž, hovoříme o reaktorech heterogenních. Tyto dvě uložení mohou mít reaktory, které při reakci využívají zpomalené neutrony a zpravidla je nazýváme reaktory tepené. Naopak rychlý množivý reaktor pracuje bez moderátoru a ke štěpení využívá rychlé neutrony. Dále se soustředíme na problematiku tepelných reaktorů.[2][9]

## 2.2 Řízená řetězová reakce

Nutné podmínky řízené štěpné reakce jsou, aby alespoň jeden neutron zapříčinil štěpení dalšího jádra, štěpení bylo zvládnutelné a kontrolované. Proces první podmínky lze vyjádřit pomocí multiplikačního koeficientu  $k$ , který udává poměr mezi počtem neutronů  $i$ -té generace neutronů k počtu neutronů její minulé generace.

$$k = \frac{n_i}{n_{i-1}} \quad (2.3)$$

kde  $n_i$  je nadcházející a  $n_{i-1}$  je současná generace.

Multiplikační koeficient rozlišujeme pro nekonečné a reálné prostředí. V multiplikačním koeficientu pro nekonečné prostředí  $k_\infty$  uvažujeme, že nedochází k úniku neutronů. Je dán součinem

$$k_\infty = \frac{n_i}{n_{i-1}} = \eta * \varepsilon * p_{ro} * f \quad (2.4)$$

kde  $\eta$  je součinitel reprodukce neutronů a vyjadřuje střední hodnotu okamžitých a zpožděných neutronů uvolněných během štěpné reakce,  $\varepsilon$  je multiplikační součinitel rychlých neutronů a vyjadřuje schopnost rychlých neutronů rozštěpit izotop  $^{238}\text{U}$ , hodnota  $p$  značí součinitel pravděpodobnosti úniku rezonanční absorpcí a vyjadřuje vliv pravděpodobnosti, že nebude neutron během zpomalování pohlcen (rezonanční oblast je pásmo, ve kterém má prvek střídavě vysoké a nízké absorpční vlastnosti),  $f$  je součinitel využití tepelných neutronů a udává poměr tepelných neutronů absorbovaných palivem k celkovému počtu tepelných neutronů, které zachytila soustava.

Pro reálné prostředí zavádíme pojem efektivní multiplikační činitel  $k_{ef}$  u kterého předpokládáme únik neutronů ze soustavy. Podle této veličiny se určí stav řízené soustavy, která se může nacházet v nadkritickém, kritickém a podkritickém stavu. Nadkritický stav znamená, že počet štěpení exponenciálně stoupá ( $k_{ef} > 1$ ), u kritického stavu je počet štěpení nezměněn a reakce je tedy samovolně udržitelná ( $k_{ef} = 1$ ) a podkritický stav značí, že počet štěpení exponenciálně klesá ( $k_{ef} < 1$ ) a vzrůstá nestabilita. Efektivní multiplikační koeficient je dán vztahem

$$k_{ef} = k_\infty * \Lambda \quad (2.5)$$

kde  $\Lambda$  je pravděpodobnost setrvání neutronu v soustavě.

Řetězová reakce se prakticky řídí zasouváním regulačním tyčí (absorbátorů neutronů) z kadmia nebo boru mezi palivové články. Dále k řízení se používá částečná koncentrace boru v moderátoru a vyhořívající absorbátory, které jsou zastoupeny v čerstvém palivu. Během

palivového cyklu se počet vyhořívajících absorbátorů snižuje a tím zlepšují kvalitu štěpení. Pokud zasouváme regulační tyče, reakci zpomalujeme. Když jsou plně ponořené v palivu, reaktor se odstavuje. Bezpečnost při poruše jaderného reaktoru zajišťují havarijní tyče s větší koncentrací absorpčních látek, které drží elektromagnet a jeho reakce při poruše je téměř okamžitá.[2]

## 2.3 Průběh reaktoru

„Jelikož jeden neutron je vždy potřeba k udržení štěpné řetězové reakce, udává  $k_{ef}$  1 přírůstek nebo úbytek neutronů za dobu života jedné generace na jeden neutron. Je-li v soustavě počet neutronů  $n$  a střední doba života jedné neutronové generace je  $T_a$ , potom může být rychlost růstu vyjádřena rovnicí.“ [2]

$$\frac{dn}{dt} = \frac{k_{ef}-1}{T_a} * n \quad (2.6)$$

a její integrací dostaneme

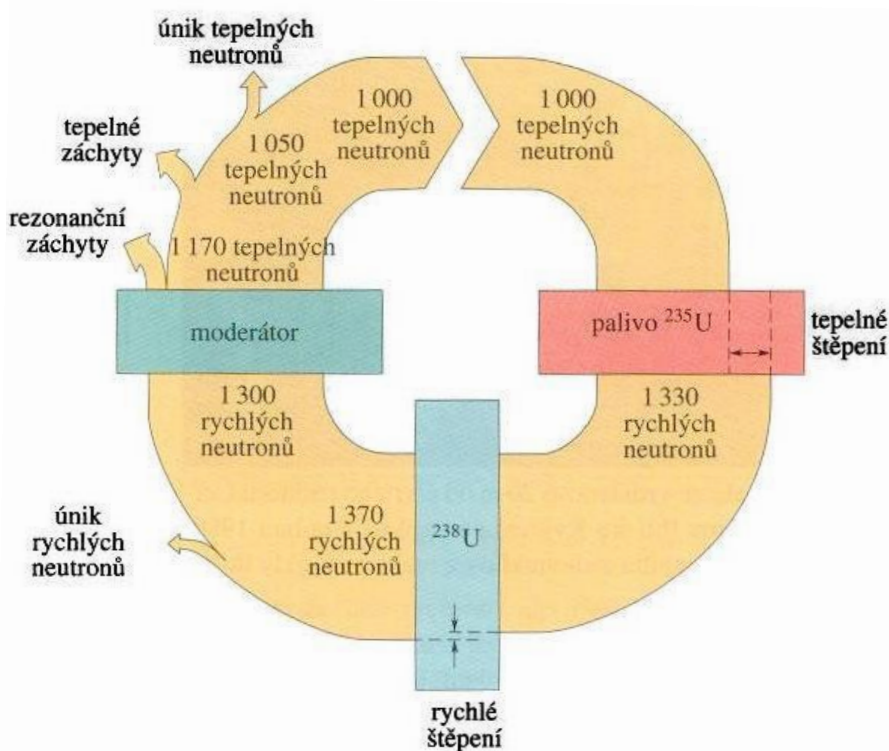
$$n = n_0 * \exp\left(\frac{k_{ef}-1}{T_a} * t\right) \quad (2.7)$$

kde  $n$  je počet neutronů,  $n_0$  je počet neutronů předchozí generace.

Vztah z hlediska kinetiky reaktoru přepíšeme na

$$\Phi = \Phi_0 * \exp\left(\frac{k_{ef}-1}{T_a} * t\right) \quad (2.8)$$

kde  $\Phi = n * v$  představuje hustotu neutronového toku. Jde o součin hustoty (počtu) neutronů  $n$  a jejich střední rychlosti  $v$ . [2]

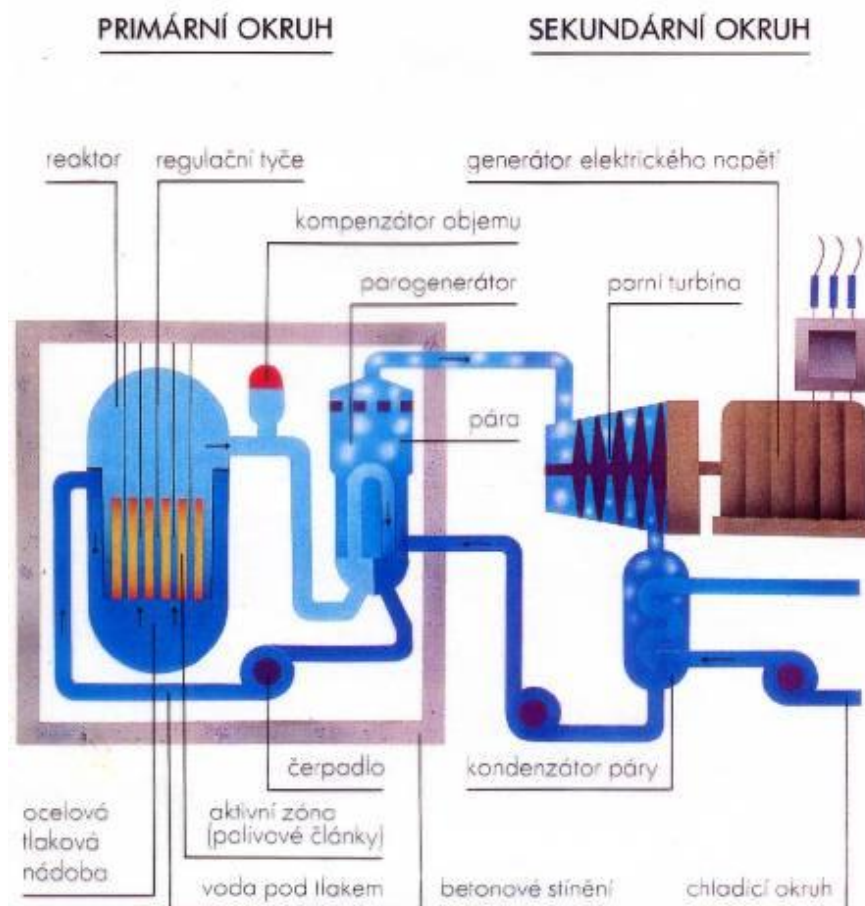


Obr. 2-2 Cyklus neutronů v tepelném reaktoru [13]

Na počátku dojde ke srážce neutronu s izotopem uranu  $^{235}\text{U}$  a nastane štěpení. To je doprovázeno násobením rychlými neutrony od  $^{235}\text{U}$  nebo  $^{238}\text{U}$ . Následuje zpomalování rychlých neutronů vlivem pružného rozptylu moderátoru. Neutron během zpomalování prochází

rezonančním pásmem a jeho vlivem může neutron ze soustavy uniknout. Z rychlých neutronů se stávají tepelné neutrony o energii  $E=0,025$  eV a rychlosti  $v=2200$  m/s. Proběhne difúze tepelných neutronů v reaktoru a část při tom unikne ze soustavy. Následuje absorpce tepelných neutronů v palivu. Je vybuzeno nové štěpení a celý cyklus se opakuje.[2][5]

## 2.4 Princip tlakovodní jaderné elektrárny



Obr. 2-3 Princip jaderné elektrárny s tlakovodním reaktorem [8]

V reaktoru dojde v aktivní zóně ke štěpné reakci a vývinu tepla, které je odváděno do parogenerátoru, ve kterém dojde k výrobě páry a současně jí separuje od radioaktivity. Kompenzátor objemu po celou dobu zajišťuje stálý tlak v přípustných mezích reaktoru. Hlavní cirkulační čerpadlo zajišťuje chlazení celého primárního okruhu. Pára je vedena dále do turbín, kde se vyrábí elektrická energie na připojeném synchronním generátoru na společné hřídeli s turbínou. Elektrická energie je vyvedena pomocí transformátorů. Za turbínami je kondenzátor, kde se udržuje podtlak a voda vede přes uzavřenou smyčku zpět do parogenerátoru. Terciální okruh, který je oddělen kondenzátorem, slouží pro rozprašování vody v chladič věži, kde voda kondenzuje do ovzduší.[5]

## 2.5 Jaderná bezpečnost

Řídí ji atomový zákon, který je všeobecným základem bezpečnosti provozu jaderných elektráren a jeho definice zní: „Jaderná bezpečnost je stav a schopnost jaderného zařízení a osob obsluhující jaderné zařízení zabránit nekontrolovanému rozvoji štěpné řetězové reakce nebo

*nedovolenému úniku radioaktivních látek nebo ionizujícího záření do životního prostředí a omezovat následky nehod.“ [11]*

### 2.5.1 Dělení jaderné bezpečnosti

Rozdělení jaderné bezpečnosti: řízení reaktivity, bariéry a chlazení.

Z hlediska řízení reaktivity se zabráňuje nedovoleným přechodovým procesům reaktivity a vzniku nekontrolované štěpné reakce v pracovním stavu, havarijním stavu i při odstavení reaktoru. Co se týče bariér, jde hlavně o zabránění úniku radioaktivních látek do životního prostředí. Z technického hlediska se hlídá stupeň celistvosti hlavního tlakového okruhu a pokrytí paliva. Dále je tady snaha o zabránění úniku radioaktivních látek z hermetické obálky v případě havárie, udržet radiační expozici v dovolených mezích, mít kontrolu nad radionuklidy v použitém palivu, jenž se dále skladuje a další. Chlazení většinou spočívá v omezení následků nehod, v podobě dostatečného přivedeného množství chladiva do aktivní zóny ve všech provozních ale i havarijních stavech. V případě porušení celistvosti při špatně odvedeném zbytkovém teplu z aktivní zóny se může například poškodit palivový soubor.[11][12]

### 2.5.2 Bezpečnost primárního okruhu

Nejvíce se hlídá předepsaný pracovní tlak z důvodu nepřekročení tlakových mezí, které by znamenali porušení bezpečnosti. To zajišťují automatické limitové systémy, systémy regulace výkonu, systémy rychlého odstavení reaktoru a pojišťovací ventily na kompenzátoru objemu. Největší důraz se klade na kvalitu provozu, opravy a údržby. Tyto požadavky obsahuje legislativní předpis, který kopíruje požadavky atomového zákona.

Nejvíce kritické místo primárního okruhu je parní generátor z důvodu, že jeho teplosměnné trubky nejsou chráněné žádnou bariérou. Při prolomení by se radioaktivní látky dostaly do dalších okruhů JE. Teplosměnné trubky mají poměrně velké rozměry, které se mohou poškodit teplem anebo chemickým režimem chladiva. Tyto dva hlavní a další jevy zapříčiní korozi materiálu teplosměnných trubek. Na vznik trhlin je při údržbě vynaložena mimořádná pozornost. Tato meziokruhová netěsnost se zjišťuje tzv. bublinkovou metodou, při které se sekundární strana parogenerátoru natlakuje dusíkem, zatímco primární strana je napuštěna demineralizovanou vodou a kamerovým systémem se hledají netěsnosti. Porušené trubky se zaslepují. Na českých jaderných elektrárnách je u jednotlivých parogenerátorů zaslepeno méně než 1% z celkového počtu trubek.[11][12]

### 3 ODVOD TEPLA Z PALIVOVÝCH ELEMENTŮ K TEPLOSMĚNNÉ PLOŠE

Za zdroj tepla můžeme považovat energii, která je uvolněná a daná intenzitou štěpení. Teplo je odváděno z těžkých jader přes plynovou mezeru v palivovém proutku do povlaku a přes povlak dále do teplosměnné plochy vedením a sdílením. Teplo putující od teplosměnné plochy do chladiva je určeno konvektivním nebo konduktivním přestupem tepla. Z důvodu rozpadu radionuklidů při odstavení reaktoru vznikne zbytkový vývin tepla, a proto je nutné zajistit požadovaný odvod tepla nejen v provozu ale i po odstávce reaktoru. Dále je teplo odváděno teplosměnnou látkou do dalších okruhů elektrárny.

#### 3.1 Vedení tepla

Vedení tepla se uplatňuje tehdy, když jsou teploty rozloženy ve stacionárním prostředí s pevně položenými vnitřními zdroji tepla. Matematické řešení této situace popisuje *Fourierův zákon*, který je v reálném prostředí komplikován rozdílnými palivovými materiály, závislostí fyzikálních parametrů na teplotě a hloubkou vyhoření paliva. Pro určení šíření tepla použijeme rovnici teplotní bilance.

$$[\text{Změna vnitřní energie látky}] + [\text{Výsledný přenos tepla vedením}] \\ = [\text{Výkon tepelných zdrojů}]$$

Změnu vnitřní energie dostaneme integrací objemu součinu výrazu parciální derivace hustoty  $\rho$ , měrné tepelné kapacity  $c$  a termodynamické teploty  $T$  tělesa podle času  $t$ .

$$\int_{V_1}^{V_2} \frac{\delta(\rho c T)}{\delta t} dV \quad (3.1)$$

„Výsledný přenos tepla vedením můžeme popsat celkovým množstvím tepla, které projde za jednotku času plochou  $S$  kolmou na hustotu tepelného toku  $q$ .“ [1]

$$- \int_{S_1}^{S_2} \lambda \operatorname{grad} T dS \quad (3.2)$$

Za výkon tepelných zdrojů dosadíme integraci tepelných zdrojů v objemu.

$$\int_{V_1}^{V_2} q_v dV \quad (3.3)$$

Po dosazení, úpravách a zavedením  $\lambda$ ,  $c$ ,  $\rho = \text{konst.}$  do rovnice teplotní bilance dostáváme

$$\frac{dT}{dt} = \alpha \Delta T + \frac{q_v}{c\rho} \quad (3.4)$$

kde  $\alpha = \lambda / c\rho$

Pro řešení musíme uvažovat počáteční a okrajové podmínky, protože rovnice popisuje pouze vedení tepla uvnitř určitého tělesa a nezahrnuje například vlivy okolí nebo tvaru konkrétního tělesa. Počáteční podmínky popisují rozložení počátečních teplot v soustavě. Okrajové podmínky dělíme na tři druhy. První okrajová podmínka pojednává o povrchovém rozložení teplot, druhá o rozložení hustoty tepelných toků a třetí objasňuje rozdělení přestupu tepla na povrchu tělesa. [1][4]

##### 3.1.1 Vedení tepla ve válcové palivové tyči

V případě, že součinitel tepelné vodivosti  $\lambda$ , součinitel přestupu tepla  $\alpha$  mezi palivovými články jsou konstantní a neuvažujeme souosé vedení, bude hledané řešení

$$T - T_p = \frac{q_v}{4\lambda} (r_U^2 - r^2) \quad (3.5)$$

Objemový vývin tepla  $q_v$  nahradíme lineárním tepelným výkonem  $q_H = q_v \pi r_U^2$  a po úpravě bude teplota v ose tyče ( $r=0$ )

$$T - T_p = \frac{q_H}{4\pi\lambda} \quad (3.6)$$

Součinitel tepelné vodivosti  $\lambda$  je závislá na teplotě například v palivu kysličníku uraničitého  $UO_2$  který se využívá v našich tlakovodních reaktorech VVER a musíme ji zahrnout do výsledného řešení. Pro určení teploty se využívá integrální tepelná vodivost  $\vartheta(T)$ .

$$\vartheta(T) = \frac{q_H}{4\pi} \left(1 - \frac{r^2}{r_U^2}\right) + \vartheta_p \quad (3.7)$$

$$\vartheta(T) = \int_0^T \lambda(T') dT' \quad (3.8)$$

Součinitel tepelné vodivosti  $\lambda(T)$  je vyjádřen pro  $UO_2$  vztahem

$$\lambda(T) = \frac{3824}{129,4+T} + 4,788 \cdot 10^{-11} \cdot T^3 \quad (3.9)$$

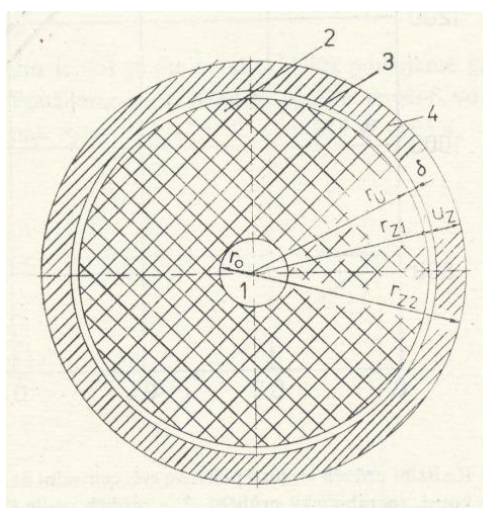
### 3.1.2 Vedení tepla v povlaku

Z obrázku řezu palivového elementu 3-1 vidíme, že palivové elementy jsou zaopatřeny povlakem. Když řekneme, že povlakem bude procházet pouze tepelný tok a ostatní vlivy vývinu tepla zanedbáme, pak se bude celkový teplotní rozdíl v povlaku rovnat

$$\Delta T = T_{s1} - T_{s2} = \frac{q_H}{2\pi\lambda_S} \ln \left( \frac{r_{z2}}{r_{z1}} \right) \quad (3.11)$$

## 3.2 Sdílení tepla mezi palivem a povlakem

Složení palivového proutku s centrální dutinou je následující



1 - centrální dutina, $r_0 = 0,75$ mm
2 - palivová tableta z $UO_2$ , $r_U = 3,775$ mm
3 - mezera palivo - povlak, $\delta = 0,125$ mm
4 - palivová trubka ze zirkoniové slitiny, $r_{z1} = 3,9$ mm, $r_{z2} = 4,55$ mm

Obr. 3-1 Řez palivovým elementem [1]

Součinitel sdílení tepla je nejvýznamněji ovlivňován šířkou mezery, vodivostí, teplotou, tlakem. Parametry jsou jeden na druhém závislé. Například, když se během vyhořívání paliva bude zmenšovat šířka, tím se bude zvyšovat teplota, bude se zhoršovat tepelná vodivost a tím i hromadit plyn v mezeře.

Pro určení vycházíme z Newtonova zákona daný rozdílem koeficientů teplot palivového elementu  $T_p$  a vnitřní strany povlaku  $T_s$ .

$$q_H = 2\pi r_F \alpha_F (T_p - T_s) \quad (3.12)$$

Celkový součinitel sdílení tepla  $\alpha_F$  je charakterizován součtem jednotlivých součinitelů vedení tepla v plynové náplni  $\alpha_g$ , na ploše styku v případě dotýkání se paliva s povlakem  $\alpha_b$  a  $\alpha_r$ , který charakterizuje přírůstek vedení tepla sáláním při vyšších teplotních rozdílech.

$$\alpha_F = \alpha_g + \alpha_b + \alpha_r \quad (3.13)$$

Postupem vyhořívání paliva bude převažovat vždy jeden ze součinitelů. Když budeme uvažovat čerstvé palivo, bude zajištěná dostatečná vzdálenost pro neuplatnění součinitele dotyku paliva s povlakem  $\alpha_b$  a tím i odstraněn zcela určitý přírůstek teplot součinitele  $\alpha_r$  a celkový součinitel sdílení bude roven  $\alpha_g$ . Vliv součinitele v plynové náplni vyjadřujeme podílem měrné tepelné vodivosti plnicího plynu  $\lambda_{He}$  ke skutečné šířce mezery  $\delta$ .

$$\alpha_g = \frac{\lambda_{He}}{\delta}$$

Jak už bylo řečeno, měrná tepelná vodivost je závislá na vyhoření paliva a je jí nutno aproximovat

$$\lambda_{vyh} = 0,0219 \left( \frac{t_g + 234,16}{573,16} \right)^{0,88} \quad (3.14)$$

kde  $t_g$  je střední teplota plynu.[1][2][4]

## 4 PŘESTUP TEPLA

Uvolněné teplo se odvádí teplonosnou látkou z aktivní zóny. Pokud nedochází k varu teplonosné látky, jedná se o jednofázové proudění a hustota tepelného toku předávaná do chladicí látky, je úměrná rozdílu teploty povrchu  $T_Z$  a chladiva  $T_C$ . Z tohoto vyplývá, že platí *Newtonův zákon zachování energie*.

$$q = \alpha(T_Z - T_C) = \alpha\Delta T_{ZC} \quad (4.1)$$

Součinitel přestupu tepla  $\alpha$  popisuje vliv geometrického tvaru, velikosti rozměrů proudovodné dráhy, fyzikální vlastnosti a charakteristiky proudění chladiva, teplotní podmínky a další veličiny, které působí na množství sdíleného tepla. Pro srovnání velikostí přestupu tepla z tabulky, je vidět, že nejhorsí podmínky nastávají v reaktorech chlazené plynem, bez ohledu na typ chladicí látky. U tlakovodních reaktorů, je vliv přestupu tepla lepší a nejpriznivější přestup tepla nastává u rychlých množivých reaktorů.

Typ reaktoru		Reaktor	Parametry chladiva					
			Výkon [MW]	rychlost [m/s]	vstupní teplota [°C]	výstupní teplota [°C]	tlak na vstupu [MPa]	součinitel přestupu tepla [kW/m²K]
Tlakovodní	PWR	Yankee	150	4,7	258	278	13,9	36
		VVER-440	440	3,5	269	301	12,2	35
		Indian Point	1000	4,8	284	316	15,4	33
Varné	BWR	Oyster Creek	540	1,8	-	-	7,2	56
		Peach Bottom	1098	2,2	275	286	7,2	85
Chlazené plynem	HWGCR	KS-150	110	60,0	105	425	6,6	5
	HTGR	Fort St. Vrain	342	-	400	770	4,9	1,3
	AGR	Dungeness-B	660	20,0	320	675	3,2	2,3
Rychlé	FBR	Phenix	250	6,5	400	560	0,5	138
		BN-350	350	8,0	300	530	0,5	118

Tab. 4-1 Znáznornění hodnot součinitele přestupu tepla u vybraných reaktorů [1]

### 4.1 Obecné řešení pomocí teorie podobností

K určení přestupu tepla se využívá teorie podobností. Jsou to principiální experimentální metody popisující řešení přestupu tepla, které je matematicky neřešitelné, protože matematické rovnice lze uplatnit pouze v případech laminárního proudění, tedy při vzájemném nepromíchávání proudnic (částic) v kapalině.

Teorie dokáže stanovit kriteriální vztahy z diferenciálních rovnic ale jejich platnost je omezena podmínkami podobnosti. Tepelná podobnost vyžaduje podobnost polí, proudů, geometrie a mechaniky, v které se musí Fourierovo, Pécletovo a Nusseltovo číslo navzájem rovnat.

$$F_o = \frac{\alpha t}{L^2} \quad (4.2)$$

$$P_e = \frac{cL}{a} \quad (4.3)$$

$$N_u = \frac{\alpha L}{\lambda} \quad (4.4)$$



Abychom mohli najít obvyklou kritériální závislost této teorie pro výpočet přestupu tepla, rozšíříme Péceletovo číslo o kinematickou viskozitu  $\nu$ . Vznikne Reynoldsovo číslo charakterizující podobnostní hydrodynamiku a Prandtlovo číslo zohledňující vlastnost tekutiny

$$Re = \frac{cL}{\nu} \quad (4.5)$$

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} \quad (4.6)$$

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (4.7)$$

Dále pro vyjádření mechanické podobnosti si určíme číslo Grasshoffovo. V této podobnosti je zastoupen teplotní rozdíl  $\Delta T$  a součinitel objemové roztažnosti  $\gamma$  tekutiny.

$$Gr = \frac{\gamma g L^3}{\nu^2} \Delta T \quad (4.8)$$

Rovnost podobnostních čísel, se zpravidla upravují do tvaru.

$$Nu = f(fo, Re, Gr, Pr) \quad (4.9)$$

Situace zjednodušujících předpokladů, při kterých odpadá vliv jednotlivých čísel:

- Stacionární proudění      Fourierovo číslo
- Nucené proudění      Grashoffovo číslo.
- Přirozené proudění      Reynoldsovo číslo

Kritériální rovnice pro stacionární a nucené proudění je pak, kde koeficienty  $k$ ,  $n$ ,  $m$  jsou bezrozměrné konstanty.

$$Nu = k Re^n Pr^m \quad (4.10)$$

A stacionární volné proudění je určeno Rayleighovým číslem představující součin Grashoffova a Prandtlova čísla. Pomocí střední teploty mezní vrstvy se určí fyzikální konstanty.

$$Nu = k (Gr Pr)^n = k Ra^n \quad (4.11)$$

Podle Prandtlova čísla se rozlišují tři skupiny kapalin a plynů. Udává poměr mezi konduktivním a konvektivním přenosem tepla, který nastává mezi povrchem palivové tyče a teplotonosnou látkou při přestupu tepla. Konduktivní přenos je vedení tepla v látce a jeho intenzita závisí na součiniteli teplotní vodivosti. Zatímco konvektivní přenos či turbulentní promíchávání je daný hlavně kinematickou viskozitou  $\nu$ .

- $Pr > 1$ , nekovové kapaliny, konvektivní přenos
- $Pr \neq 1$ , plyny libovolných a kapaliny v úzkém rozmezí teplot, vlivy intenzity konduktivního a konvektivního přenosu se neliší
- $Pr \ll 1$ , všechny tekuté kovy, konduktivní přenos [1][2][4]

## 4.2 Jednofázové proudění

### 4.2.1 Jednofázové nucené proudění – konvektivní přestup

Je to nejčastější odvod tepla z reaktorů charakterizován kritériální rovnicí (3.22). Jestliže je  $Re > 10^4$  dochází k nejintenzivnějšímu tepelnému promíchávání. Prudké změny teplot jsou v mezní vrstvě, zatímco v jádru proudu zůstává teplota konstantní. Použití konstant  $k=0,023$ ,  $n=0,8$  a  $m=0,4$  v rovnici (3.22) platí pro  $Re > 10^4$ ,  $0,7 < Pr < 2500$  a pro poměr délky potrubí k hydraulickému průměru potrubí  $50 < l/d_h$ . Vzorec (3.24) je přesný jen při poměru  $T_z/T_c \approx 1$ .

$$Nu = 0,023 Re^{0,8} Pr^{0,4} \quad (4.12)$$

$$d_h = \frac{4S}{O} \quad (4.13)$$

kde A je plocha průřezu toku a O smáčený obvod.

Rovnici (4.12) násobíme korekčním činitelem zahrnující vliv teplotního spádu v mezní vrstvě, protože se průběh teplot v mezní vrstvě mění s rostoucím teplotním spádem.  $Pr_C$  je určené ze střední teploty chladiva a  $Pr_Z$  je určen teplotou stěny.

$$k_T = \left(\frac{Pr_C}{Pr_Z}\right)^{0,25} \quad (4.14)$$

Anebo korekčním činitelem  $k_Z$ , který charakterizuje vliv součinitele přestupu tepla ve vzdálenosti  $z$ .

$$k_Z = \frac{2,8}{Re_m^{0,06}} \left(\frac{z}{d_h}\right)^{-2,25 Re_m^{-0,3}} \quad (4.15)$$

#### 4.2.2 Jednofázové přirozené proudění – konvektivní přestup

V tomto případě proudění vycházíme z kritériální rovnice (3.23). Díky výsledkům z experimentů se rozlišují tři úseky na společné křivce přestupu tepla do prostoru.

- Laminární proudění  $1 \cdot 10^{-3} < Ra < 5 \cdot 10^2$ ;  $k = 1,18$ ;  $n = 0,125$
- Vířnaté proudění  $5 \cdot 10^2 < Ra < 2 \cdot 10^7$ ;  $k = 0,54$ ;  $n = 0,25$
- Turbulentní proudění  $2 \cdot 10^7 < Ra < 1 \cdot 10^{13}$ ;  $k = 0,135$ ;  $n = 0,33$

Dále vyhodnocujeme bezrozměrné kritérium  $\varepsilon_k$ , což je poměr ekvivalentní tepelné vodivosti k tepelné vodivosti. Ekvivalentní tepelná vodivost zohledňuje složitou situaci v omezených prostranstvích, kde proudění závisí na šířce mezery  $b$  a určuje v ní sdílení tepla.

$$\varepsilon_k = \frac{\lambda_{ekv}}{\lambda} \quad (4.16)$$

Jednotlivé hodnoty bezrozměrného kritéria určených podle  $Ra$

- $Ra < 10^3$   $\varepsilon_k = 1$
- $10^3 < Ra < 10^6$   $\varepsilon_k = 0,105 Ra^{0,3}$
- $10^6 < Ra < 10^{10}$   $\varepsilon_k = 0,4 Ra^{0,2}$

V oblasti  $10^3 < Ra < 10^{10}$  lze použít zjednodušení, spočívající v použití jediné aproximace

$$\varepsilon_k = 0,18 Ra^{0,25} \quad (4.17)$$

Bezrozměrného kritéria použijeme v Nusseltově čísle.

$$\alpha = \frac{\lambda_{ekv}}{b} = \frac{\varepsilon_k \lambda}{b} \quad (4.18)$$

#### 4.2.3 Jednofázové nucené proudění – konduktivní přestup

Při velmi malém  $Pr$  se neuplatní  $Re$  číslo a nucené proudění je charakterizováno pouze  $Pe$ . Vztah platí pouze v kruhovém kanálu.

$$Nu = f(Pe) = a + kPe^n \quad (4.19)$$

Pro technické kovy s kruhovým kanálem se uvádí hodnoty koeficientů:  $a = 5,25$ ,  $k = 0,0188$ ,  $n = 0,8$ . Pro výpočet přestupu tepla na povrchu  $d_1$  je vztah násoben poměrem  $d_2/d_1$ , který pro prstencovitý kanál musí být větší než 1,4.

$$Nu = (5,25 + 0,0188Pe^{0,8})\left(\frac{d_2}{d_1}\right)^{\frac{1}{3}} \quad (4.20)$$

#### 4.2.4 Jednofázové přirozené proudění – konduktivní přestup

V tomto případě je přirozené proudění charakterizováno vztahem  $GrPr^2$  a výsledky z experimentů při  $Gr > 100$  určují vztah [1]

$$Nu = k\left(\frac{GrPr^2}{1+Pr}\right)^n \quad (4.21)$$

Hodnoty koeficientů pro laminární a turbulentní proudění jsou

- $100 < Gr < 1 \cdot 10^8$        $k = 0,67; n = 0,25$
- $1 \cdot 10^8 < Gr$                $k = 0,16; n = 0,33$

### 4.3 Dvofázové proudění

Dvofázové proudění je velice dynamický proces, který mění charakter přestupu tepla. Při výpočtech se bude vycházet z Newtonova zákona (4.1). Proces například nastává v reaktorech PWR, u kterých může dojít k varu vody během pracovního režimu.

Var můžeme rozdělovat podle:

#### 1) Teploty chladiva

- Povrchový var (místní, nedohřátý), můžeme ho pozorovat, je-li teplota chladiva  $T_c$  nižší než teplota sytosti  $T_{sat}$  a teplota teplosměnného povrchu  $T_z$  je větší než  $T_{sat}$ .
- Objemový var (nasycený, čistý var) probíhá v celém objemu chladiva, dosáhne-li teplota chladiva  $T_c$  teploty sytosti  $T_{sat}$ .

#### 2) Intenzity varu

- Bublínkový var charakterizovaný malou hustotou tepelného toku z povrchu do chladiva a malým rozdílem teploty stěny  $T_z$  a teploty sytosti  $T_{sat}$ .
- Blánový var, nastávající při velké hustotě tepelného toku.

#### 3) Podle cirkulace chladiva

- Přirozená konvence ve velkém objemu
- Přirozená konvence v uzavřeném objemu
- Nucená konvence

Z grafické experimentální závislosti hustoty tepelného toku  $q$  na rozdílu teploty stěny a chladicí kapaliny  $\Delta T_{zc}$ , je možné charakterizovat jednotlivé obecné i krizové stavy a zákonitosti pro režimy varu ve velkém objemu, přičemž pro každý režim musíme použít jiného tvaru rovnice pro výpočet součinitele přestupu tepla  $\alpha$ . [1][7]



$$q = q_{kr} - c(T_Z - T_{Z,kr}) \quad (4.25)$$

Vztah byl experimentálně odvozen ve vertikálním kanálu kruhového průřezu při délce 317mm a průměru 3,9 mm.

P [MPa]	13,8	8,3	5,5
$10^6 \cdot c$	1,7376	1,8625	2,3678

Tab. 4-2 Hodnoty konstanty  $c$  pro vztah (4.25) [1]

#### Ustálený blánový var

Ve IV. oblasti se uplatňuje přenos tepla vedením a zářením z teplosměnného povrchu, který je plně pokryt parní blánou do chladicí kapaliny. Interval varu je  $\Delta T_{ZC,G} \leq \Delta T_{ZC}$ .

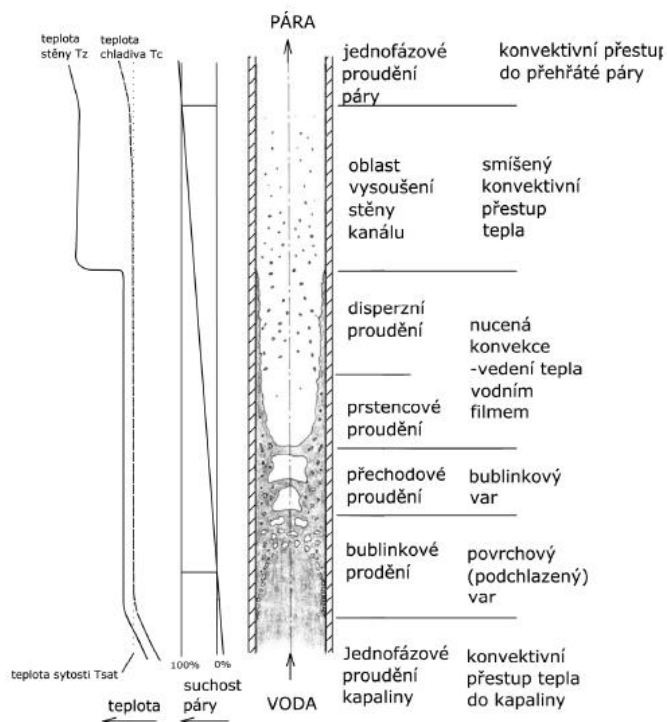
$$Nu^{\parallel} = 0,023(Pr^{\parallel})^{0,4}(Re^{\parallel}[x + (1-x)\frac{\rho_l}{\rho_g}])^{0,8} \quad (4.26)$$

Vztah byl odvozen při podmínkách hmotnostního průtoku 400–2000 kg/m<sup>2</sup>s; 3,4MPa < p < 22MPa a při 0,06 < x < 1 suchosti páry.

Pro body D, E a F s rozdílem teplot  $\Delta T_1 = \Delta T_2 = \Delta T_3$  odpovídají určité hustotě tepelnému toku  $q_n$ . Rozebereme situaci pro pracovní bod E, který se nachází v nestabilní oblasti. Nastane-li náhlé zvýšení výkonu přejde bod E do bodu F. Náhlý vzrůst výkonu, způsobí vyšší povrchovou teplotu, přičemž odváděný výkon bude klesat. Bod zvratu nastane v bodě G kde má růst teploty povrchu nejvyšší rychlost ohřevu, v němž je i rozdíl vyvinutého a tepelného výkonu  $\Delta q_n$  maximální. Bod E se ustálí na křivce mezi body G a H v hodnotě rozdílu tepelného toku  $\Delta q_n$ . Obdobně při okamžitém poklesu výkonu přejde bod E do bodu D.[1][7]

#### 4.3.1 Režimy proudění vody ohříváním kanálem

Obrázek 4-2 znázorňuje jednotlivé oblasti dvoufázového proudění charakterizující režimy varu ve vertikálním vytápěném kanálu.



Obr. 4-2 Režimy dvoufázového proudění vody procházející kanálem[7]

Jednofázové proudění

Pokud je teplo odváděno z povrchu konvencí je vedení v průřezu proudu jednofázové. Tento stav nastává, když teplota stěny kanálu nepřevyšuje teplotu sytosti o teplotní rozdíl potřebný pro var chladicí kapaliny blízko stěny.

Bublínkové proudění

- Nevyvinutý podchlazený var

Jestliže má teplota stěny vyšší teplotu než je teplota sytosti chladiva za podmínky že přehřátí u stěny chladiva je dostatečné začnou vznikat parní bublinky. Část vyvinutého tepla je předáváno chladivu, který zapříčiní zvýšení teploty kapalné fáze, zatímco druhý příspěvek tepla je předáván na tvorbu bublinek. Na začátku oblasti je větší podchlazení, kde značná část bublinek zaniká při styku se studenější kapalinou. V této oblasti ještě nedochází k významnému odtrhávání bublinek od stěny.

- Vyvinutý bublinkový var

Přesáhne-li teplota stěny teplotu sytosti teplotonosné látky, jedná se o vyvinutý bublinkový var, který je charakterizován částečným bublinkovým anebo plně rozvinutým bublinkovým varem na povrchu stěny. Jádro proudu zůstává podchlazené  $T_c < T_{sat}$ . Tvorba bublin závisí na rozdílu tlaku v bublině a na hodnotě lokálního tlaku kapaliny, ve kterém se bublina nachází. Pokud bude odvedené teplo menší, než teplo přivedené k bublině bude bublina růst a až nabude dostatečné velikosti, dojde k jejímu odtržení ze stěny do chladiva. Jestliže dojde k přerušení kondenzace bublinek do chladiva, přechází proces do objemového bublinkového varu.  $T_c = T_{sat}$ .

**4.3.1.1 Krize varu prvního druhu**

Vyvinutý bublinkový var vlastně symbolizuje krizi varu prvního druhu, který je charakteristický intenzivním vzrůstem teploty stěny na vysoké hodnoty, které mohou způsobit její poškození. Vlivem vysokých tepelných toků bude docházet k odpařování bublin vznikající na povrchu a tím se zhorší přestup tepla vlivem nedostatečného průchodu kapaliny ke stěně. Při velkém průtoku kapaliny nastává termodynamická nerovnováha mezi kapalinou vyskytující se v blízké vzdálenosti od stěny a jádrem proudu kapaliny, při níž proudí bublinky paralelně s povrchem. Krize varu prvního druhu je závislá na vlastnostech kapaliny blízko stěny a pravděpodobně začíná při vytváření parní blány, která průběžně osciluje.

Kritický poměr  $b_{kr}$  udává míru bezpečnosti a proto je tato hodnota důležitá pro realizaci a projektování. Vytvoření krize závisí na kritické hodnotě tepelného toku  $q_{kr}$ .

$$b_{kr} = \frac{q_{kr}}{q} \quad (4.25)$$

Přechodové proudění (dutinové)

Dochází k počáteční přeměně přechodu proudění z kapalné fáze (bublinky v kapalině) na parní fázi (kapky v páře) přičemž je proces doprovázen tvorbou velkých bublin (dutiny v kapalině). Další zvýšení teploty zapříčiní více bublin, které budou větší, početnější a jejich spojením vzniknou velké dutiny v proudu kapaliny. To celé vede k destabilizaci systému chlazení, ve kterém se vyskytnou velmi silné oscilace blánového režimu, a zároveň nastane zvíření průchozího proudu.

### Prstencové proudění

V prstencovitém proudění nastane vlivem sloučení nestabilních dutin jednotné parní jádro. Jádro z páry má větší rychlost než kapalina tvořící film v blízkosti stěny a může obsahovat rozptýlené kapky syté chladicí kapaliny. Zvětšení tloušťky filmu u stěny nastane v případě, že dojde k usazování rozptýlených kapek mezi kapalnou a parní fází. Naopak zmenšení tloušťky filmu zapříčiní přechod bublin do parního jádra přes vrstvu syté kapaliny vznikající v blízkosti stěny a také vlivem odtrhávání kapek ze špiček povrchových vln tvořící rozhraní mezi párou a kapalinou.

### Disperzní oblast

V proudu je vzrůstající podíl páry. Jejím vlivem dojde u kapek k menší tvorbě a menšímu usazování což způsobí vznik velkých parních bublin. Kapalná fáze je tvořena pouze rozptýlenými kapkami, protože kapalný film u stěny je velmi malý a téměř vymizel.

#### **4.3.1.2 Krize varu druhého druhu**

Tato krize bývá označována v případě vzniku suchých míst na povrchu stěny, to může také nastat v případě havárie týkající se ztrátou chladiva. Krize se nachází z hlediska varu v prstencovité a disperzní oblasti ve velkých průtocích hmotnostních obsahů páry, kde voda jako chladicí látka je odpařována, postupně vysychá, až se z ní nakonec u stěny stane parní fáze a teplota stěny roste. Součinitel přestupu tepla je u stěny velmi příznivý a teplota stěny se neohřívá moc rychle a je možné dosáhnout stabilizace, při dostatečně málo zvýšené teplotě stěny a nedošlo-li k porušení soustavy. Objevuje se v nízkých tepelných tocích, její hmotnostní průtok může být někdy malý, ale vlivem zvýšeného množství páry bude zpravidla rychlost průtoku větší. V systémech velké hmotnostní a průtočné pracovní oblasti závisí kritický tepelný tok na typu proudění, skluzovém poměru, rychlosti páry, středním podílu páry, tloušťce kapaliny u stěny a dalších. Vyskytuje se především u reaktorů, které jsou chlazené vroucí vodou.

### Oblast vysoušení stěny kanálu

Při úplném vypaření filmu je kapalná fáze tvořena velmi malými kapkami v parním proudu. Při styku se stěnou se okamžitě kapičky vypařují a není zde žádná teplonosná látka ochlazující plochu stěny.

### Jednofázové proudění páry

Kapalina je vypařena a průtok je tvořen pouze parní fází charakterizující konvektivní přestup do přehřáté páry.[1][7]

## **4.4 Experimentální metody zabývající se určením krizí varu**

*„Cílem experimentálního i teoretického úsilí je vyvinout výpočetní metody schopné s přijatelnou přesností stanovit hodnoty kritických tepelných toků pro složitou geometrii palivových svazků a pro podmínky, které se vyskytují v aktivní zóně reaktoru. V případě jaderného reaktoru vstupuje do výpočtu velké množství ovlivňujících parametrů: nerovnoměrnost rozložení tepelných zdrojů po výšce i poloměru svazku tyčí, případná zpětná vazba mezi hustotou dvoufázového proudu a výkonovými charakteristikami svazku, vliv různého způsobu distancování palivových tyčí, charakteristiky svazku i primárního okruhu vzhledem k možnému výskytu nestabilit atd.“[7]*

Teoretické hledání řešení lze rozdělovat na řešení jednotlivých jevů krize přestupu tepla, kde se řeší a znázorňují podrobně přesně dané aspekty vlivů popisující například vznik, růst a odtrhávání bublin. A na druhou skupinu, která má Fenomenologický přístup a krize přestupu tepla se vyhodnocuje jako celek a proto se musí co nedůvěryhodněji reflektovat podmínky v aktivní zóně.

#### **4.4.1 Metoda empirických vztahů**

Je to metoda založená na pozorování nějakého pokusu a vztahy jsou tedy získané opakovanými a ověřenými experimenty. Získaný vztah se nazývá korelační vztažený k podmínkám a soustavě, ve kterém byl experiment prováděn. Následně musí být i ověřen návrhovou praxí aspoň u jednoho z výrobců reaktorů. Je to velice intuitivní přístup a výsledky korelačního vztahu jsou srovnávány podle vztahů, které už byly stanoveny jinými lidmi pro podobné oblasti parametrů.

#### **4.4.2 Metoda rozměrové analýzy**

V této metodě se využije rozbor podmínek modelování, správnost experimentů a obecně se popíše výsledky. To se provádí většinou na kruhové trubce z důvodu jednoduché geometrie a možností rovnoměrného rozložení teploty po celé délce trubky. Je fyzikálně odůvodněno, že krize tepelného toku je závislá na parametrech daného systému a parametrech chladiva.

#### **4.4.3 Metoda podobnosti**

Je založena na rozměrové analýze a na matematickém stanovení fyzikálního modelu. Rozměrovou analýzou jsou stanovena dílčí bezrozměrné kritéria, které odůvodníme a i upřesníme pomocí matematické analýzy modelu, kterou je také nutné převést na bezrozměrné dílčí tvary.[7]



## 5 MODEL EXPERIMENTÁLNÍHO ZAŘÍZENÍ PRO STUDIJNÍ ÚČELY KRIZE VARU

Model se navrhne na základě školního zařízení, které se nyní nachází na VUT Fakultě strojního inženýrství v Brně. Zhotoví se teoreticky model primárního okruhu v programu TRACE. A sestaví se model pro měření čerpadla, který bude vyhodnocen. Tento zkoumaný model bude mít okruh s odpojenou testovací sekci, kondenzátorem a kompenzátozem objemu, protože při měření čerpadla se tyto komponenty bypasovali. Měření probíhalo bez výhřevu proudící kapaliny, a proto se v modelu žádný výhřev neuvažuje. Poté proběhne korelace s reálně naměřenými daty a vyhodnocení vytvořeného modelu v zapojení pro testování čerpadla.

Veličina	Hodnota	Jednotka
Pracovní médium	demi voda	-
Rozsah pracovních tlaků	0,1-1,5	MPa
Maximální teplota média	198,3	°C
Vstupní teplota do testovací sekce	45-198,3	°C
Maximální škrcení média do testovací sekce	1,5	MPa
Maximální tlak za čerpadlem	2,5	MPa
Průtok	0,026-0,66	kg/s
Maximální odváděný tepelný výkon při $\Delta T=10^{\circ}\text{C}$	100	kW
Výkon přehříváku	20	kW
Průměr topné trubice	9-25	mm
Průměr obálkové trubice	14,7-69,3	mm
Délka topné trubice	0,2-2,5	m

Tab. 5-1 Provozní parametry experimentální smyčky [14]



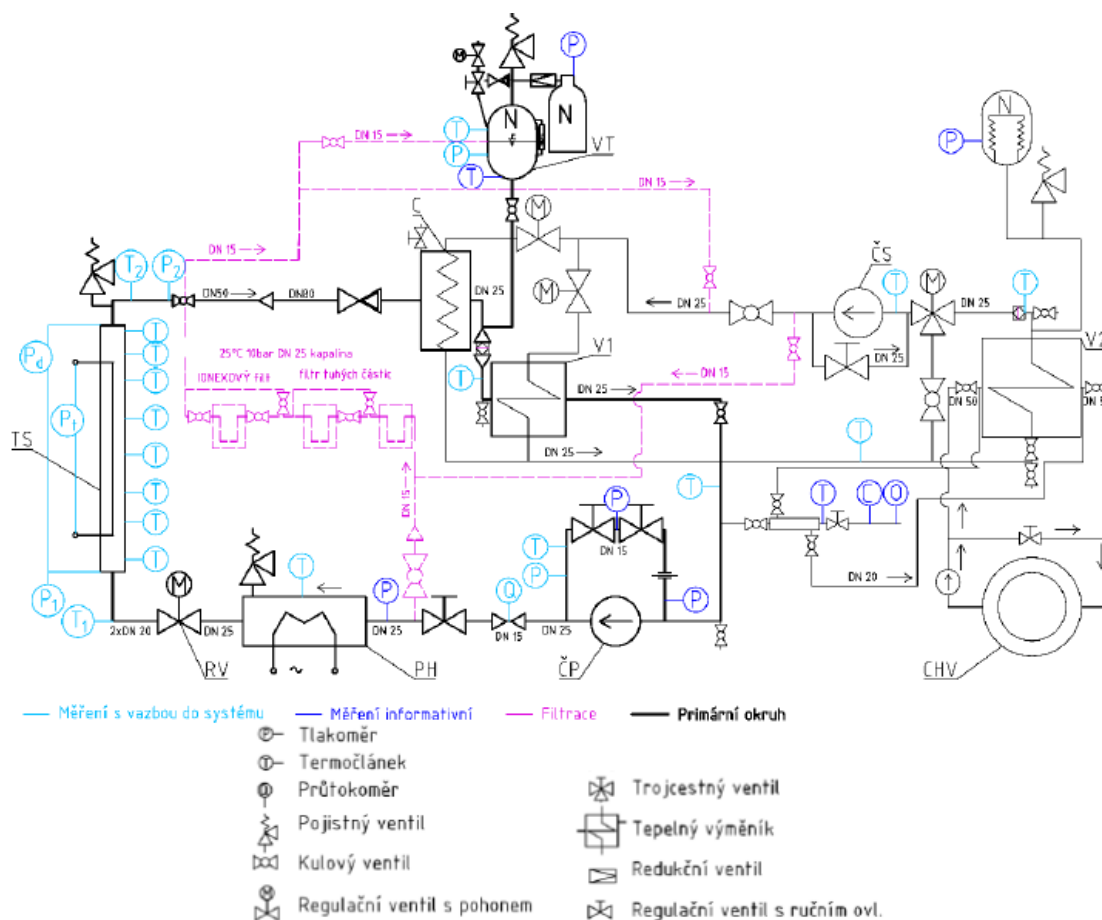
Obr. 5-1 Reálná vizualizace smyčky [14]

## 5.1 Experimentální zařízení

Experimentální smyčka používá pro měření termohydraulických charakteristik dvoufázového proudění jako pracovní médium demineralizovanou vodu, která je dodávána z tepláren Brno a.s. Pro skladování demineralizované vody je využíván kontejner o kapacitě 1000L s víkem opatřeným absorbatorem CO<sub>2</sub>. Experimentální smyčka je doplňována demineralizovanou vodou kampaňovitě při odstávce zařízení přes armaturu před cirkulačním čerpadlem.

Chlazení primárního okruhu je zajišťováno hlavním cirkulačním čerpadlem **ČP**, který je opatřen bypassem pro plynulou regulaci v oblasti nízkých tlaků na potrubí **DN25**. Potrubí dále vede přes konfuzor na **DN15**, který zajistí vyšší rychlosti v Coriolisově průtokoměru **Q**. Za průtokoměrem je difuzor, který opět vrátí rychlost pomocí **DN25** a odbočka k mechanickým a iontovým filtrům. Odbočka je po celé měření uzavřena a po skončení experimentu se celý obsah vody prožene tímto filtračním okruhem při plně zavřeném regulačního ventilu **RV**. Dále se za difuzorem nachází přehřívák **PH**, který ohřívá vlivem nepřímého ohřevu demineralizovanou vodu na potřebnou teplotu, než vstoupí do testovací sekce **TS**. Před testovací sekcí se nachází regulační ventil s pohonem **RV**, jenž slouží k regulaci průtoku. **TS** je zajištěna deseti termočlánky, které snímají teplotu soustavy a v případě poruchy zajišťují bezpečnost chodu. V testovací sekci se na vstupu i na výstupu hlídají parametry teploty a tlaku demineralizované vody. Testovací sekce je tvořena trubicí s povlakem ze zinku, která je vytápěna. Kapalina následuje do kondenzátoru **C**, před kterým je v případě výskytu poruchy zrealizována zpětná klapka s **DN80**. Za kondenzátorem se reguluje tlak pracovní kapaliny kompenzátozem objemu **VT** s vlastním zdrojem tlaku v podobě dusíkaté láhve. Přes redukční ventil se tlakuje prostor nad kapalinou z dusíkaté lahve do požadované úrovně. V případě přetlaku se dusík odvádí do atmosféry přes solenoidový ventil a proti vzniku imploze je ke kompenzátoru objemu připojen zavzdušňovací ventil s **DN15**. Za kondenzátorem se měří teplota pro regulaci demivody sekundárního okruhu a potrubí směřuje do výměníku **V1** a smyčka je uzavřena přes **ČP**.

Sekundární okruh slouží k odvodu přebytečného tepla. Je opatřen sekundárním čerpadlem **ČS**, který je rovněž pro regulaci nízkých průtoků zaopatřen bypassem. Potrubí směřuje do **C**, **V1** a přes výměník **V2** se teplo odvádí do terciálního okruhu. V kterém se teplo pomocí chladicí věže **CHV** odvádí do okolí. V soustavě je zrealizován i filtrační okruh sloužící k čištění smyčky od nečistot, který je vyznačený fialovou čárkovanou čarou. Je zaopatřen filtrem tuhých a ionexových částic.[14]



Obr. 5-2 Technologické schéma [14]

## 5.2 Termohydraulický program TRACE

Program na modelování tepelného toku proudící chladicí kapaliny byl vyvinut ve Spojených státech amerických, kde existoval ve formě jednotlivých programátorských kódů s využitím pro určité typy reaktorů. V roce 1990 bylo rozhodnuto, že jednotlivé programátorské kódy, které byli vyvinuty pro PWR, BWR, CANDU a dalších reaktorů budou sloučeny dohromady. Vývoj programu TRACE v tomto roce započal. Program počítá jednofázové a dvofázové proudění. Jednofázové slouží pro výpočet hlavního proudění a k výpočtu ustálených stavů. Výpočet dvofázového proudění se využívá u BWR v ustáleném stavu anebo pro vyhodnocení parametrů v sekundárním okruhu PWR. Pro vytvoření modelu tepelné soustavy je v TRACE zahrnuta velká knihovna pro sestavení různých typů jaderných elektráren.[10]

## 5.3 Grafické rozhraní SNAP

Společnost, která vyvíjela program TRACE vytvořila současně nový specifický binární a grafický soubor. Obsahuje v podstatě všechny parametry, které si uživatel může po analýze simulace zjistit. Soubor nese speciální formát trextv., který komprimuje a minimalizuje data svým způsobem. Program zahrnuje vlastní grafické rozhraní SNAP, který je schopen číst a přepisovat tento soubor. Rozhraní SNAP zahrnuje Model editor, Job status a klientskou aplikaci Configuration Tool.[15]

Model editor je hlavním prvkem setu SNAP. Lze v něm například tvořit modely elektráren, animace teplotních, tlakových, rychlostních polí atd. Tento editor je zodpovědný za vývoj a modifikaci vstupu navrženého modelu pro podporované analytické kódy programu TRACE, které stanoví analýzu ze zhotovené soustavy prvků. Kromě toho je také zodpovědný za tvorbu a

navrhování pracovních toků. Job status se používá k zobrazení stavu úloh. Naskytne-li se chyba ve výpočtu modelu, můžeme ji nalézt v textovém souboru, který po výpočtu poskytuje Job status. Bezchybný i chybný výpočet stavu lze otevřít v aplikaci APT plot, ale je důležité, aby TRACE vytvořil soubor, který podporuje aplikace APT plot. Tato aplikace slouží pro grafickou vizualizaci parametrů v jednotlivých komponentách. V Configuration tool se vyplní osobní nastavení a nastaví se softwaru pro podporu programů, se kterými uživatel bude pracovat.[17]

## 5.4 Model experimentální smyčky

Model představuje pouze primární okruh experimentálního zařízení. Je propojen uzly se sekundárním okruhem, ve kterých probíhá výměna teploty. Simulovaný okruh se skládá z cirkulačního čerpadla, přehříváku, testovací sekce, kondenzátoru a výměníku. Komponenty jsou propojeny potrubím a při jeho modelování se uvažovalo se změnou nadmořské výšky. Jelikož ještě neproběhlo měření na celé smyčce. Byl primární okruh pouze teoreticky vymodelován. Simulace se vytvořila podle manuálů programu TRACE.[10][15][16] Vyhodnocení proběhlo pouze na zjednodušené simulaci, která se zabývá testováním čerpadla.

Níže jsou uvedeny hodnoty použité v modelu. A zavedená zjednodušení při modelování, které mohly ovlivnit celkový výpočet.

- Jelikož se vnitřní průměr u všech potrubí měnil. V určitých úsecích pouze v řádech jednotek milimetrů. Uvažoval se při modelování jednotný vnitřní průměr potrubí daný jmenovitou světlostí DN25 (jmenovitá světlost je průměrná hodnota vnitřního průměru trubky). A tím jsme zavedli, že hodnota jmenovité světlosti se rovná hydraulickému průměru v potrubí podle rovnice (4.13).
- Uvažoval se jednotný hydraulický průměr 25 mm u všech komponent modelu. (nejen potrubí)
- Přehřívák a kondenzátor byl vymodelován podle střední délky.
- Byl uvažován pouze regulační ventil situovaný před TS.
- Byla navržena jedna hadice, která napájí TS.
- Pro každé obloukové koleno se zadal ztrátový součinitel  $\xi=0,24$  mm.[19]
- Drsnost povrchu pro bezešvou použitou ocel, ze které se skládá okruh má hodnotu  $k_p=0,275$  mm.[18]
- Vlnovcová nerezová hadice, která napájí za regulačním ventilem TS, byla zhotovena trubicí. Drsnost EPDM hadice je  $k_p = 0,01$  mm.[18]

### Čerpadlo - Přehřev

Okruh se začal modelovat u čerpadla. Z knihovny hydraulic components se vybralo rychlostně řízené čerpadlo a zadal se hydraulický průměr trubky 25mm, přes které bude proudit chladicí médium. K čerpadlu se zhotovila z knihovny control systems funkce, do které se zadala tabulka činnosti čerpadla. Vstup funkce se propojil s výpočtním časem v TRACE a její výstup se propojil s čerpadlem. Pracovní průběh čerpadla je daný uvedenými hodnotami v tabulce. Na čerpadlo navazuje potrubí o DN25, které vede do přehřevu. Z knihovny se vybrala trubka, v které se zadal počet nodů a hydraulický průměr. Počet nodů určí, na kolik dílků se trubka vnitřně rozdělí a tím počet výpočtů pro daný komponent. Ve vzniklých nodech ji lze různě ohýbat, zadávat parametry její délky, objemu a hydraulického průměru. Zadali jsme hodnotu počtu nodů 10 a s jejich pomocí jsme vytvořili potrubí mezi čerpadlem a přehřívákem. Potrubí vede 46,1 cm vodorovně s čerpadlem a pak spádem o 20 cm. Následuje rovný 84,5 cm úsek a pak vede výtlakem o 75,5 cm, kde se stočí do vodorovné polohy a vede ještě 92,2 cm, kde se připojí

na předeřívák. Při zadání délky se dopočítá sám objem válcové trubky a při zvolení hydraulického průměru se v tabulce dopočítají průtočné plochy pro každý nod.

#### Předeřívák - Testovací sekce

Předeřívák je ve vodorovné poloze ve výšce 55,5 cm oproti čerpadlu a celkově měří 977,3 cm. Předeřív je tvořen trubkou s 5 nody. Do předeříváku se zakomponovala tepelná struktura. Vnitřní průměr výhřevného tepelného pole se zvolil 5 mm a vnější průměr 20 mm. U tepelného pole se zvolilo 5 nodů a tato struktura se propojila s trubkou symbolizující předeřívák. Z předeřívu vede potrubí výtlakem 15,9 cm, přes regulační ventil a dále o velikost 28,1 cm, kde se stáčí do vodorovné polohy a následuje 10 cm úsek. Zde na potrubí navazuje vlnovcová nerezová hadice namodelována z trubky. Měří 2,121 metrů s uvažovaným spádem 56,4 cm a napájí testovací sekci.

#### Testovací sekce – Kondenzátor

TS je napájena z dolní části kde chladicí médium směřuje do horní části. Sekce zahrnuje vytápěný proutek, který simuluje palivový proutek v jaderném reaktoru. TS měří 1,6 m a je vybavena výhřevným tepelným polem o vnitřním průměru 5 mm a vnějším průměru 10 mm. Z testovací sekce směřuje potrubí 65,26 cm vodorovně a spádem 31,17 cm do kondenzátoru.

#### Kondenzátor - Výměník

Kondenzátor je vytvořen podobně jako předeřívák. Tedy střední délkou, která činí 90 cm. Ale se zdvojenou komponentou pro primární a sekundární okruh. Komponenta pro sekundární okruh je propojena s primární komponentou pomocí tepelné struktury. Výhřevné pole primární části má vnitřní průměr 2 mm a vnější průměr 20 mm. Sekundární trubka kondenzátoru má na vstupu připojenou komponentu fill a na výstupu break. V těchto dvou komponent se zadají parametry tlaku, teploty a rychlosti sekundárního okruhu na vstupu a výstupu. Z kondenzátoru vede potrubí spádem o 31,14 cm a pak vodorovně délkou 93,35 cm kde se napojí do armatury. Tato armatura propojuje kondenzátor, kompenzátor objemu a výměník. Ke kompenzátoru objemu měří trať 1,68 m. Samotný kompenzátor objemu je zhotoven z komponenty prizer, ve které se nastaví pracovní tlak a maximální přípustný tlakový rozdíl. Od armatury vede k výměníku spád 31,95 cm a úsek 16,15 cm potrubí, který napájí výměník.

#### Výměník – Čerpadlo

Výměník je obdobně vytvořen jako kondenzátor, ale tepelná struktura spojující primární a sekundární část zasahuje do celé teplosměnné plochy trubky. Tedy má vnitřní průměr 1 mm a vnější průměr 25 mm. Tudíž odevzdává do sekundárního okruhu více tepla. Výměník měří 28,08 cm a má spád 23,4 cm. Z výměníku vede potrubí vodorovným úsekem 1,173 m, za ním následuje spád o 20,3 cm a nakonec je potrubí zakončeno 43,8 cm úsekem, který se napojí zpátky na čerpadlo.

## **5.5 Model pro test čerpadla**

Test čerpadla probíhal s bypassevanou testovací sekcí a kondenzátorem. Vliv kompenzátoru objemu nebyl také uvažován. Bypass se provedl pomocí vlnovcové nerezové hadice z vývodu za regulačním ventilem do armatury před výměníkem. Tento bypass se navrhl vzdušnou čarou o délce 2,117 m a se spádem 46,46 cm. Tabulka funkce čerpadla je nastavena tak, aby po dobu 15 sekund nastal rovnovážný stav v celém okruhu a pak až naběhlo během 5 sekund čerpadlo na rychlost toku 1,59 m/s. Regulační ventil za předeřívákem byl otevřen pro maximální průtok na 86%. Pro jednotlivé úseky v potrubí se zvolila počáteční hodnota tlaku a teploty. Tlak se nastavil

na přibližnou místní hodnotu tlaku u jednotlivých komponent získanou z měření. A počáteční teplota se nastavila na 293 K. Nakonec byla zvolena časová doba celkového výpočtu, která činila 200 sekund.

Získané hodnoty z měření

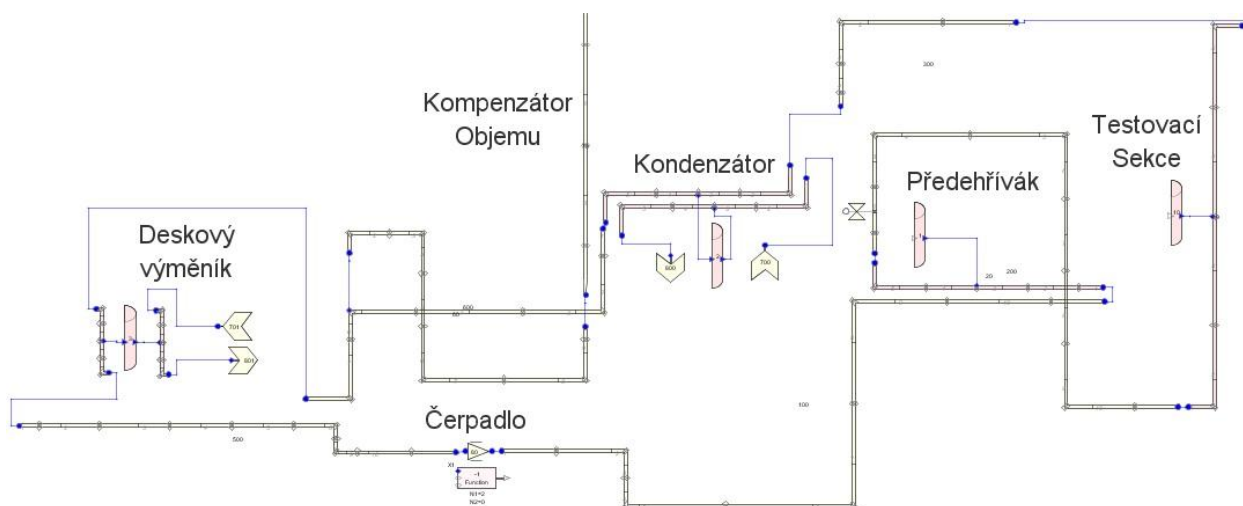
- Průtok kapaliny  $Q = 2816 \text{ kg/h} = 7,822 * 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$
- Otáčky čerpadla  $n = 2950 \text{ ot/min}$
- Tlak na vstupu čerpadla  $p = 138,47 \text{ kPa}$
- Tlaková ztráta čerpadlem  $\Delta p = 357,9 \text{ kPa}$
- Tlak na výstupu čerpadla  $p = 495,48 \text{ kPa}$
- Tlak na vstupu do předehřevu  $p = 198,58 \text{ kPa}$

Rychlost pro kruhové potrubí s průměrem 25 mm

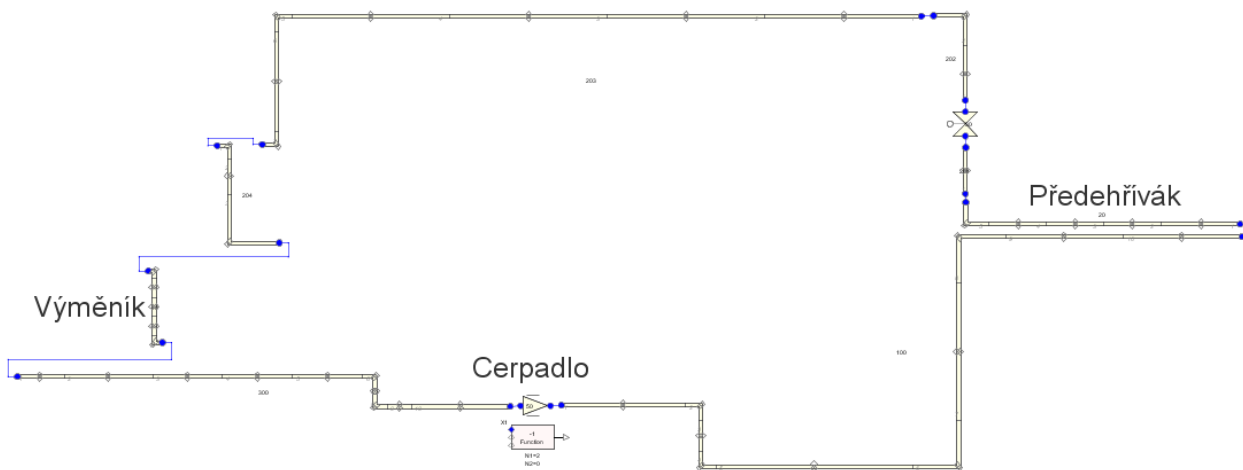
$$v = \frac{Q}{S} = \frac{Q}{\frac{\pi d^2}{4}} = \frac{7,822 * 10^{-4}}{\frac{\pi * 0,025^2}{4}} = 1,59 \text{ m/s}$$

### 5.5.1 Vyhodnocení

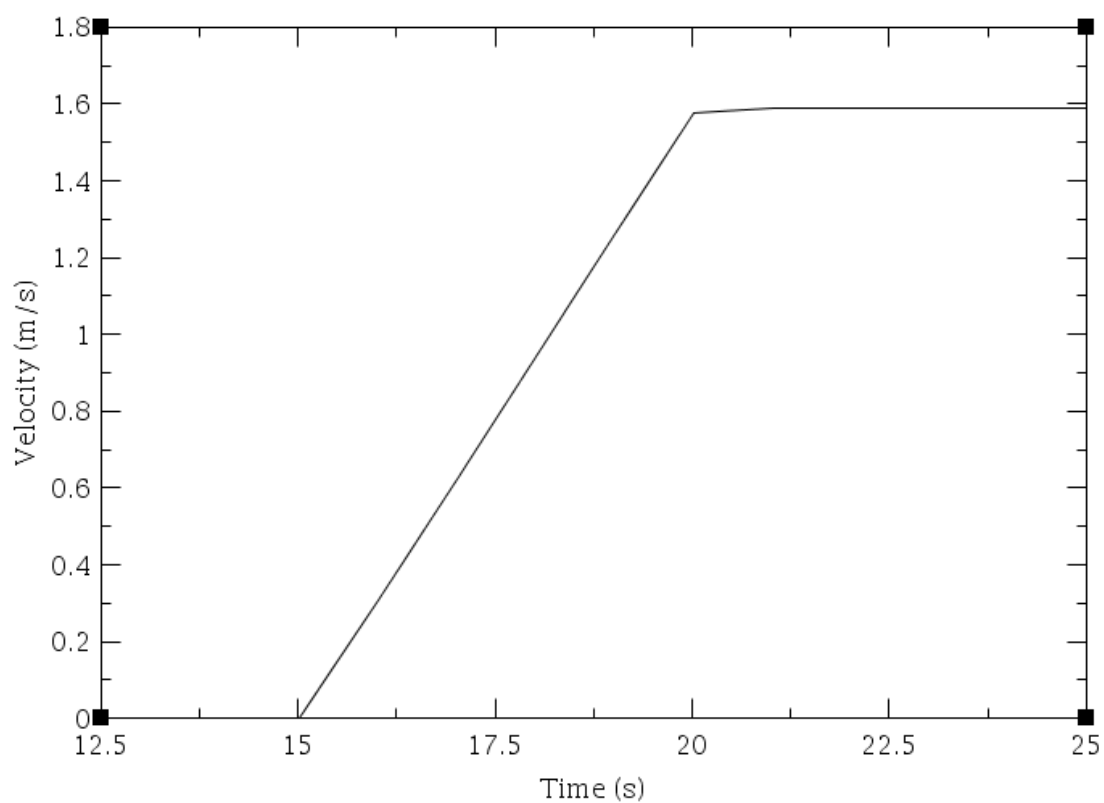
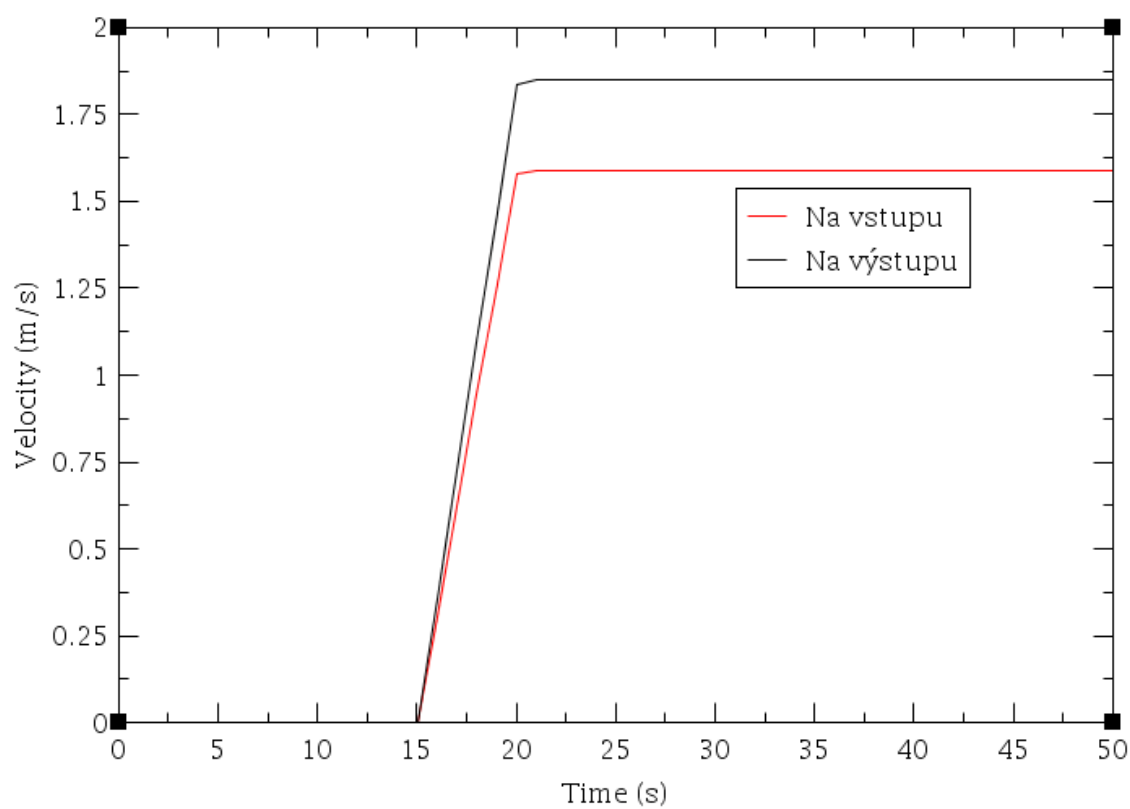
Návrh modelu pro primární okruh a pro test čerpadla v grafickém rozhraní SNAP je znázorněn na obr. 5-3 a obr. 5-4. Spustil se výpočet pro okruh s čerpadlem. Vynesli se průběhy tlaků v měřených místech a průběh rychlosti toku proudícího média na čase. Tyto grafické výsledky jsou uvedeny na obr. 5-4 až obr. 5-10.



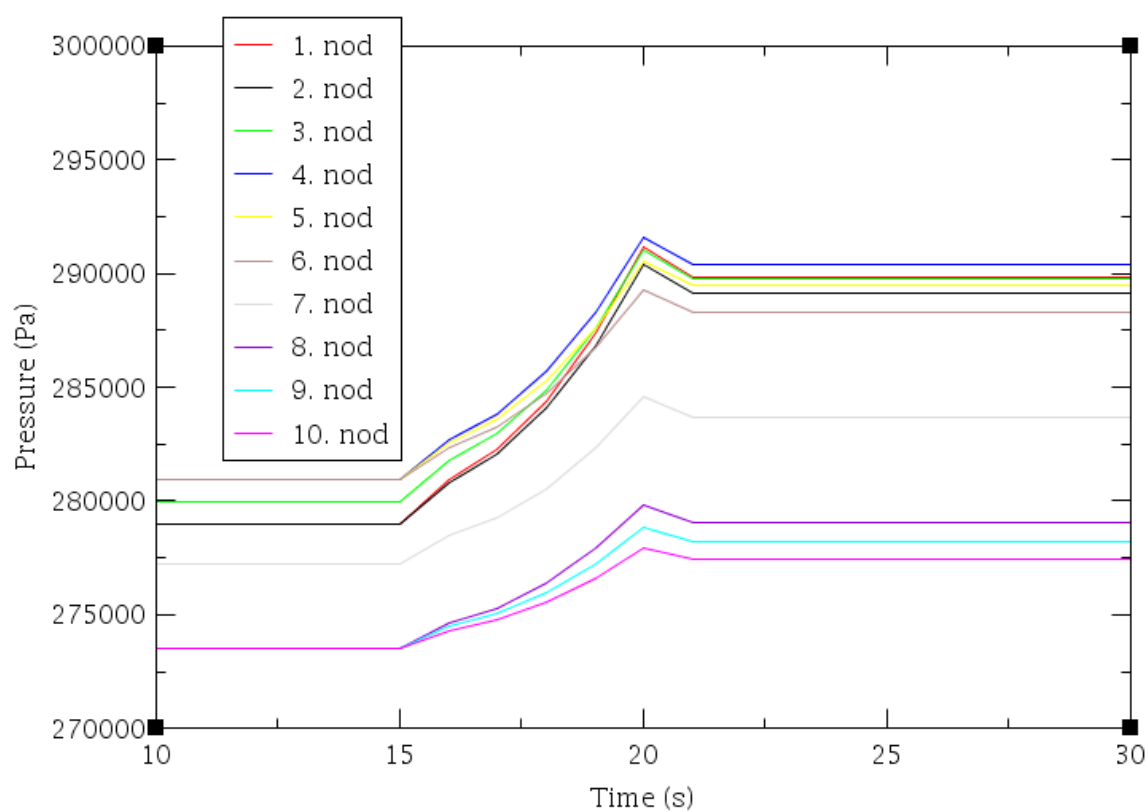
Obr. 5-3 Návrh primárního okruhu v grafickém rozhraní SNAP



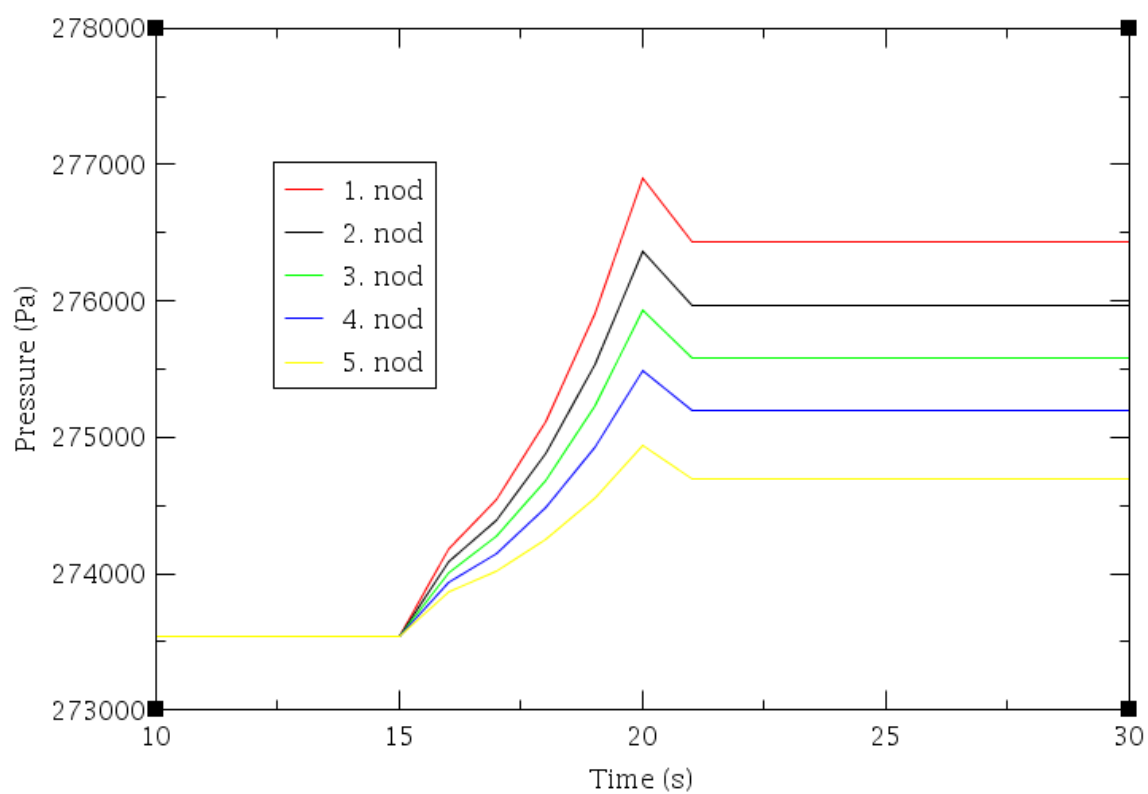
Obr. 5-4 Okruh pro test čerpadla

*Obr. 5-5 Náběh čerpadla**Obr. 5-6 Reakce RV*

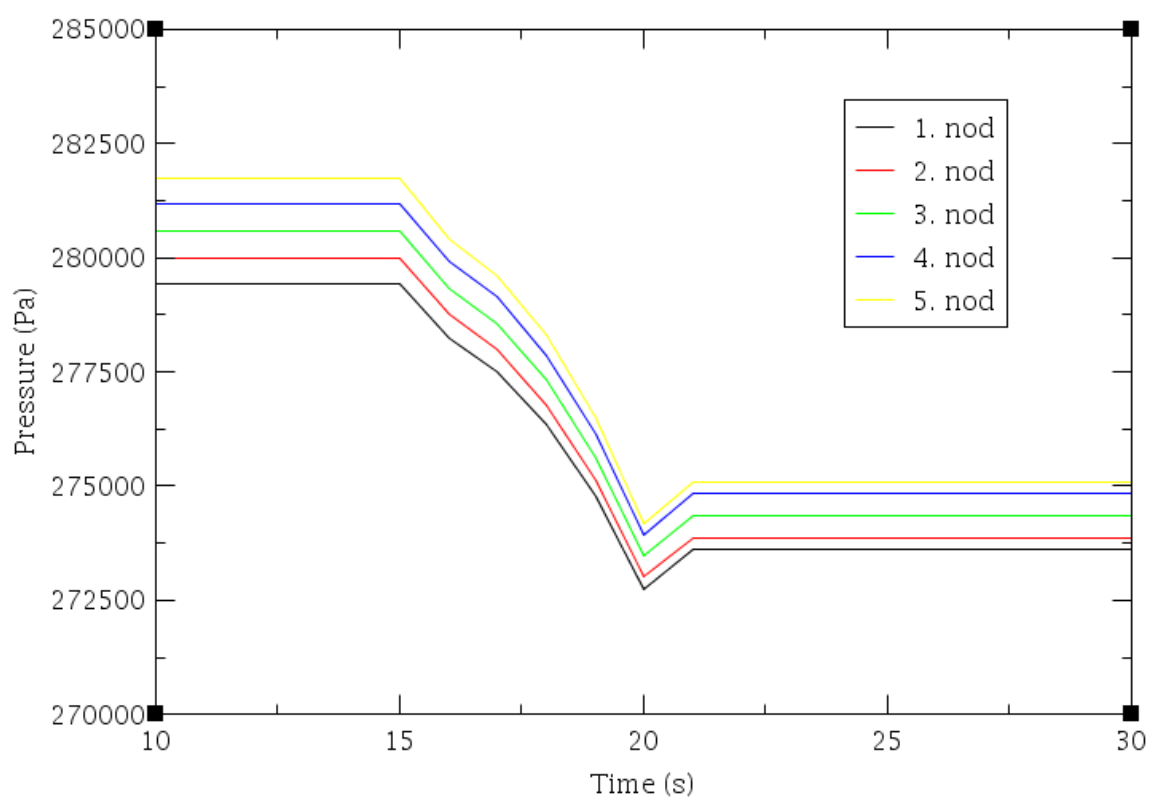




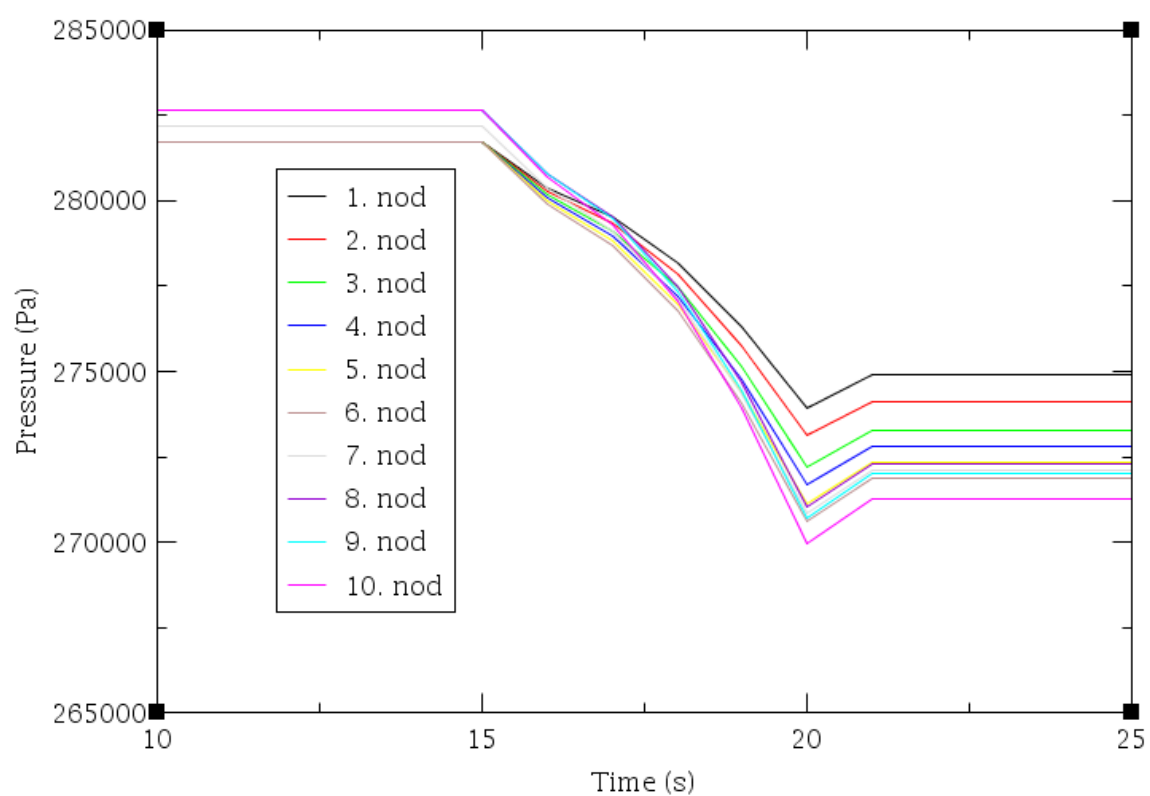
Obr. 5-7 Tlak potrubí úseku CP-PH



Obr. 5-8 Tlak na PH



Obr. 5-9 Tlak na V



Obr. 5-10 Tlak potrubí úseku V-CP

Ustálený stav nastal krátce po náběhu čerpadla, a proto byl zkoumaný interval od 10s po 30s. Náběh čerpadla se vypočítal podle očekávání, přičemž RV byl otevřen na 86%. Při zvýšení otevření RV by se průtok snížil, protože dosahuje v tomto nastavení maximální rychlosti. RV zvýšil rychlost proudění na 1,875 m/s.

Jelikož se tlak znázornil podle všech nodů v komponentě, uvažujeme jeho střední hodnotu. Počáteční ustálený stav v potrubí mezi CP a PH je 278kPa a po rozběhu se zvýšil na 282 kPa. Tlak na PH se z počátečního tlaku 273,5 kPa zvedl na 275,5 kPa. Tlaková ztráta na výměníku činila po rozběhu čerpadla 10 kPa. A na úseku potrubí mezi V a CP činí tlaková ztráta 20 kPa.

Tabulka výsledků je uvedena v Tab. 5-2. Nasimulovaný tlakový průběh nevyšel podle naměřených hodnot, ale v podstatě se přiblížil k možnému řešení. Důsledek toho může být nedostatečné kvalifikování v programu TRACE.

Veličina	Měření	TRACE	Pozn.
v [m/s]	1,59	1,59	rychlost na výstupu z CP
P [kPa]	495,48	291	na výstupu z CP
P [kPa]	198,58	276,25	tlak před PH
P [kPa]	138,47	272,5	tlak na vstupu do CP

*Tab.5-2 Porovnání výsledků z měření*

## 6 ZÁVĚR

V historii lidstva se staly už tři těžké havárie jaderných elektráren. U tlakovodního reaktoru Three Mile Island a varných reaktorů instalovaných ve Fukušimě došlo ke ztrátě chladiva. Tyto havárie na těchto dvou jaderných elektrárnách byli způsobené spíše lidskými chybami při projektování elektráren. Černobilský reaktor RBMK na němž se prováděl test, byl provozován v zakázaném pásmu malých výkonů. To vedlo k mžikovému zvýšení reaktivity a ke globálním problémům. I přes zavedení nespočet bezpečnostních aktivních a pasivních systémů v průběhu 60. let nelze vyloučit vznik dalších havárií se stoprocentní jistotou.

Problematika KTT není úplně objasněným jevem. Vzniká vlivem přechodu jednofázového proudění na dvoufázové. Jeho široký výskyt nutí vědecká pracoviště po celém světě zkoumat tuto problematiku v různých řešeních experimentálních zařízení. Z bezpečnostního hlediska má tento jev u tlakovodních reaktorů velký význam. Při nestandardním provozu může dojít k výskytu krize varu chladicího média a to by mělo za následek poškození palivových tyčí, který by mohl přerůst až v tavení aktivní zóny.

Práce v úvodní části obsahuje shrnutí základních informací o jaderné energetice a jaderné bezpečnosti. V další kapitole je vysvětlen odvod tepla vedením z jaderného paliva a přestup tepla skrz plynovou mezeru kde se dále teplo odvádí do chladicího média. Práce zahrnuje stanovení tepelného toku od obecného řešení až po experimentální metody a seznámení s krizí varu chladicí látky u PWR reaktorů. Dále obsahuje popis experimentální smyčky pro studijní účely krize varu, která je postavena na Fakultě strojního inženýrství v Brně. Dále je uvedeno seznámení s termohydraulickým programem TRACE a grafickým rozhraním SNAP.

Na základě vytvořené 3D vizualizace experimentální smyčky v programu Autocad Inventor, v rámci jiné práce, se sestavil v grafickém rozhraní SNAP primární okruh experimentální smyčky. Tento okruh se dále upravil pro test čerpadla, na kterém proběhlo měření a vyhodnocení zjednodušeného modelu. Výsledky modelu jsou uvedeny v Tab. 5-2.

## POUŽITÁ LITERATURA

- [1] HEŘMANSKÝ, Bedřich. *Termomechanika jaderných reaktorů*. 1. Praha: Academia, 1986. ISBN 21-087-86.
- [2] RAČEK, Jiří. *Jaderné elektrárny*. 1. Brno: Areálová knihovna FEKT VUT, 2002. ISBN 80-214-2945-3.
- [3] *Atomová energie, zpravodajství* [online]. 2013 [cit. 2015-12-29]. Dostupné z: <http://atominfo.cz/2013/11/profesor-bedrich-hermansky-reci-ze-jsme-zavisli-na-ruskem-palivu-jsou-nesmysl/>
- [4] BEČVÁŘ, Josef a kol. *Jaderné elektrárny*. 2. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1981. ISBN 04-237-81.
- [5] DOLEŽAL, Jaroslav, Jiří ŠTASTNÝ, Jan ŠPETLÍK, Stanislav BOUČEK a Zbyněk BRETTCHNEIDER. *Jaderné a klasické elektrárny*. 1. Praha: České vysoké učení technické, 2011. ISBN 978-80-01-04936-5.
- [6] RAČEK, Jiří. *Energetická zařízení: Stroje a zařízení jaderných elektráren*. 1. Brno: Areálová knihovna FEKT VUT, 2004. ISBN 80-214-2735-3.
- [7] SUK, Ladislav. *Konstrukční návrh části zařízení pro studijní účely krize varu*. Brno, 2012. Diplomová práce. VUT. Vedoucí práce Jiří Martinec.
- [8] *Základní reaktorové typy* [online]. [cit. 2015-12-29]. Dostupné z: <http://www.physics.muni.cz/~blazkova/dp/Reaktor7.htm>
- [9] *Jaderná reakce a jaderná energie* [online]. [cit. 2015-12-29]. Dostupné z: <http://astronuklfyzika.cz/JadRadFyzika3.htm>
- [10] *Trace V5.840 Theory manual: Volume 1: Field Equations, Solutions Methods, and Physical Models* [online]. USA Washington: U. S. Nuclear Regulatory Commission [cit. 2015-12-29]. Dostupné z: <http://pbadupws.nrc.gov/docs/ML0710/ML071000097.pdf>
- [11] URBANČÍK, Libor. *Jaderná a radiační bezpečnost*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství Cerm, 2015. ISBN 978-80-214-5238-1.
- [12] URBANČÍK, Libor. *Jaderná bezpečnost: na půdorysu atomového zákona*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2014. ISBN 978-80-214-4971-8.
- [13] *Jaderná energetika* [online]. 2015 [cit. 2015-12-29]. Dostupné z: [http://energetika.cvut.cz/files/JE%20-%20prednaska-03%20Zacha%20\(ZS%202015\).pdf](http://energetika.cvut.cz/files/JE%20-%20prednaska-03%20Zacha%20(ZS%202015).pdf)
- [14] SUK, Ladislav. *Kritické tepelné toky na hladkých a upravených površích*. Brno, 2015. Pojednání ke státní doktorské zkoušce. VUT. Vedoucí práce Jan Fiedler.
- [15] *Trace V5.0 User's Manual: Volume 1: Input Specification* [online]. USA Washington: U. S. Nuclear Regulatory Commission [cit. 2016-05-04]. Dostupné z: <http://pbadupws.nrc.gov/docs/ML1200/ML120060239.pdf>
- [16] *Trace V5.0 User's Manual: Volume 2: Modeling Guidelines* [online]. USA Washington: U. S. Nuclear Regulatory Commission [cit. 2016-05-04]. Dostupné z: <http://pbadupws.nrc.gov/docs/ML0717/ML071720510.pdf>

- [17] *Symbolic Nuclear Analysis Package (SNAP): User's Manual Version 2.2.1* [online]. Bloomsburg PA: Applied Programming Technology, Inc., 2012 [cit. 2016-05-04]. Dostupné z: <https://www.aptpilot.com/snap/manuals/SNAPUsersManual.pdf>
- [18] Drsnost potrubí. *Vodovod.info* [online]. 2013 [cit. 2016-05-17]. Dostupné z: <http://www.vodovod.info/index.php/tabulky/196-drsnost-potrubu#.VzsNdZGLTIU>
- [19] *Potrubní systémy a armatury* [online]. Ostrava, 2011 [cit. 2016-05-17]. Dostupné z: <http://www.ipotrubu.cz/clanky/5.-hydrodynamicke-a-termodynamicke-vypocty/2.-vypocet-tlakovych-ztrat/3.-mistni-tlakove-ztraty.html>